



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN SINÓPTICA DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN BARCELONA DURANTE EL AÑO 2017

Miguel Álvarez Castillo

Grado de Geografía
Trabajo Fin de Grado. Junio 2018
Tutora: Dra. M^a del Carmen Moreno García

Agradecimientos:

A mi tutora, M^a del Carmen Moreno, por su tiempo, interés y dedicación.

A mi familia, por apoyarme y ser mis compañeros de viaje desde el primer momento.

	Pág.
RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Motivación	4
1.2. Objetivos e hipótesis	5
1.3. Metodología	6
2. MARCO TEÓRICO: LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA	7
2.1. Definición de contaminación atmosférica urbana. Emisión e inmisión.	7
2.2. Principales contaminantes y sus fuentes	7
2.3. Efectos de la contaminación	10
2.3.1. En la salud de la población	10
2.3.2. En la vegetación	11
2.3.3. En el tiempo y clima	12
2.4. Medición y control de la contaminación	13
2.5. Normativa vigente sobre la contaminación	15
2.6. Medidas de reducción de la contaminación	18
2.7. Las condiciones meteorológicas y la contaminación	19
3. ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN SINÓPTICA DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN BARCELONA DURANTE EL AÑO 2017	22
3.1 El área de estudio y las estaciones empleadas	22
3.2. Estudios sobre contaminación atmosférica en la ciudad de Barcelona	27
3.3. Evolución mensual de los contaminantes en la ciudad	28
3.4. Caracterización sinóptica	35
3.4.1. Frecuencia anual, mensual y estacional de las situaciones sinópticas	35
3.4.2. Caso de estudio 1: El episodio del mes de noviembre	39
3.4.3. Caso de estudio 2: El episodio del 23 de junio	55
4. CONCLUSIONES	59
5. BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	65

RESUMEN

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se realiza un estudio sobre la contaminación atmosférica en la ciudad de Barcelona a lo largo del año 2017. La finalidad principal es determinar los episodios de mayor concentración de contaminación y analizar las condiciones meteorológicas que se dieron durante los días de dichos episodios.

Para ello se utiliza la base de datos diarios de contaminación, proporcionada por la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica de la Generalitat de Catalunya, correspondientes a las diferentes estaciones automáticas de la ciudad. Se analizan las concentraciones de cinco contaminantes: el dióxido de nitrógeno (NO_2), el monóxido de nitrógeno (NO), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), el ozono (O_3) y las partículas (PM_{10}). Se realiza el análisis de la evolución anual de la concentración de cada contaminante, a partir de los promedios mensuales calculados de cada uno.

Se realiza también un análisis sinóptico, a partir de los mapas diarios de la presión atmosférica en superficie y en altura (500 hPa), determinando la situación sinóptica de cada día del año, además del cálculo de la frecuencia anual, mensual y estacional de dichas situaciones. Asimismo, se seleccionan algunos episodios destacados de concentración de la contaminación para su análisis sinóptico detallado.

Los resultados obtenidos confirman la relación clara entre las situaciones sinópticas de estabilidad atmosférica y la inversión térmica con el incremento de la concentración de la contaminación atmosférica urbana en Barcelona.

Palabras clave: Contaminación atmosférica urbana, inversión térmica, condiciones meteorológicas, situación sinóptica, Barcelona.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas a los que nos enfrentamos en el mundo globalizado en el que vivimos es el de las desorbitadas cantidades de contaminantes que diariamente emitimos a la atmósfera.

Este hecho ha producido que hayamos alcanzado los niveles de dióxido de carbono global más altos en los últimos 650.000 años, según datos de la NASA. Los efectos, de hecho, ya son presentes y palpables en diferentes aspectos. El aumento de la temperatura global es un hecho: hasta nueve décimas desde 1880, contribuyendo a la disminución de la capa de hielo en el Ártico o el aumento del nivel del mar (NASA, 2018).

De manera general, las mayores emisiones de contaminantes se encuentran en los países desarrollados y, principalmente, en sus ciudades. Estas zonas se encuentran expuestas a altísimos niveles de contaminación, fruto de emisiones causadas por automóviles, el transporte público o las actividades industriales. En ocasiones, la elevada concentración de dichos contaminantes ha obligado a las instituciones a restringir el tráfico durante el episodio de contaminación (Cohen et al., 2004).

Es en esta escala en la que se estudiará el tema para este Trabajo Final de Grado. Concretamente, se centrará en la ciudad de Barcelona, una de las más importantes a nivel internacional. No solo se hará un análisis de la contaminación en dicha ciudad, sino que se relacionará de manera directa con la meteorología, tal y como se explicará en el apartado correspondiente.

1.1. Motivación

La decisión de realizar este Trabajo viene a raíz de la sugerencia aportada por el tutor del mismo, la Dra. María del Carmen Moreno, a la que agradezco su ayuda para la decisión del tema, el cual me ha permitido obtener conocimientos sobre una temática que no dominaba en profundidad, y relacionarlo, además, con una de mis pasiones, la meteorología.

La meteorología me ha acompañado desde bien pequeño, cuando para mí solo significaba ver cada noche los espacios meteorológicos en televisión. Poco a poco y de forma autodidacta, fue despertándose más y más interés, hasta el punto de convertirse en mi pasión y en una meta a alcanzar. Toda esa implicación ha permitido que, por suerte, haya

podido hacer de mi pasión, mi trabajo, después de varios años ya en medios de comunicación.

Considero que el tema elegido es una buena oportunidad para aprender cosas nuevas. Por lo tanto, la idea de realizar este trabajo me permite seguir trabajando con algo que me apasiona, a la vez que trata sobre una temática que se encuentra fuera de mi zona de confort, en este caso la contaminación atmosférica.

Como ciudadano del área metropolitana de Barcelona he podido advertir los efectos de las importantes concentraciones de contaminantes durante varios episodios. Es por eso que analizar un área de estudio conocida y, además, un fenómeno que te afecta directamente, son puntos que incrementan el interés del tema. Además, es un tema de plena actualidad, tratado en muchos medios de comunicación, y, sin duda, un problema a combatir en los años que vivimos.

Por lo tanto, los objetivos que se detallarán a continuación quedan lejos de proponer soluciones para la contaminación o medidas para reducirla. La meteorología y la contaminación atmosférica serán los pilares fundamentales para el análisis, así como la relación entre ambas.

1.2. Objetivos e hipótesis

El Trabajo se plantea a partir de un objetivo general. Dicho objetivo se centra en el análisis de la contaminación atmosférica en Barcelona durante el año 2017, así como su relación con las condiciones atmosféricas diarias, determinando qué situaciones sinópticas son más propicias para el aumento de la concentración de contaminación.

El objetivo principal se ha desglosado en los siguientes objetivos:

- analizar los promedios mensuales calculados de los distintos contaminantes
- determinar las situaciones sinópticas diarias y calcular su frecuencia anual, mensual y estacional
- seleccionar como casos de estudio diferentes episodios observados con un notable incremento de la contaminación

- identificar las situaciones sinópticas más favorables para la concentración de la contaminación.

El Trabajo se plantea también como hipótesis que, de acuerdo a las características geográficas y climáticas de Barcelona, las situaciones sinópticas características de estabilidad atmosférica y, en especial, la presencia de inversión térmica, son las más favorables para producir un incremento de la concentración de contaminación.

1.3. Metodología

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado la metodología seguida ha contemplado el empleo de diferentes procedimientos y la aplicación de diversas herramientas.

Por un lado, los datos diarios de concentración de la contaminación proporcionados por la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Qualitat de l'Aire (XVPCA), impulsada por el Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Catalunya, se han tratado con software Excel, con el que se ha realizado el tratamiento estadístico, obteniendo los cálculos y gráficos deseados.

Otro aspecto clave de este Trabajo ha sido el análisis de las situaciones sinópticas durante el año 2017. Los mapas sinópticos, de superficie y de altura (500 hPa), que han sido empleados son los proporcionados por el Servicio Meteorológico Alemán (Wetterzentrale). Para la interpretación de los mismos y la determinación de las situaciones sinópticas se ha seguido el modelo propuesto por Martín Vide (2005), aplicando también la experiencia personal en este ámbito.

En los casos de estudio seleccionados se ofrecerán datos meteorológicos de algunas de las estaciones meteorológicas oficiales de la ciudad de Barcelona, cuyos datos son proporcionados por el Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat).

Adicionalmente, se ha realizado cartografía a partir de software SIG (Sistema de Información Geográfica), concretamente el programa ARCMAP, para ilustrar la localización de las estaciones automáticas de contaminación en el área de estudio. La realización de mapas se hará a partir de las bases cartográficas ofrecidas por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

2. MARCO TEÓRICO: LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA

2.1 Definición de contaminación atmosférica urbana. Emisión e inmisión.

Son muchos los estudios que tratan sobre la contaminación atmosférica en las ciudades, principalmente, desde que las emisiones aumentaron considerablemente. Además, no sólo enfocados hacia un ámbito ambiental, sino también hacia la salud pública.

En este aspecto, se considera la contaminación urbana como uno de los riesgos ambientales más importantes a nivel global. La contaminación atmosférica en las ciudades se manifiesta principalmente a partir de mediados del S.XX como resultado de procesos industriales y se ha mantenido hasta la actualidad, principalmente, favorecida por los combustibles fósiles empleados para el transporte y la generación de energía, entre otras actividades (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Se entiende como contaminación atmosférica la emisión de contaminantes que permanecerán durante un tiempo determinado en la atmósfera y que dependerá de las características químicas de cada contaminante en concreto. Este tiempo se denomina tiempo de residencia. Las emisiones tienen diferentes focos emisores que propician la expulsión de contaminantes hacia la atmósfera. Para dichos contaminantes se puede conocer la concentración en un determinado punto, lo que se conoce habitualmente como nivel de inmisión (Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya, 2018).

Los procesos anteriormente mencionados, como el transporte o la generación de energía, son algunos de los que provocan la emisión de grandes cantidades de contaminantes, desde los contaminantes de formación primaria como el dióxido de azufre o el plomo, hasta los de formación secundaria como el ozono (Ballester, 2005).

2.2. Principales contaminantes y sus fuentes

En las ciudades se producen diferentes tipos de contaminantes. Los principales que pueden distinguirse son:

- Monóxido de carbono (CO)

Es un gas incoloro, no irritante, que no tiene ni olor ni sabor. El CO se produce a partir de la combustión del carbón, producido por actividades humanas, además de por fuentes naturales. En el caso antrópico, el monóxido de carbono se expulsa principalmente a partir de los automóviles.

El CO, al entrar en contacto con el medio ambiente, permanece en la atmósfera un promedio de dos meses. Puede reaccionar con otros compuestos en la atmósfera creando el dióxido de carbono (CO₂), aunque esta formación también se puede producir a partir de microorganismos en el suelo o en el agua.

En el ser humano, el monóxido de carbono es inhalado a través de la respiración y expulsado durante la exhalación, aunque no es inmediato. Puede provocar problemas de corazón o pulmón (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012).

- Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Se pueden distinguir dos tipos de óxidos de nitrógeno introducidos por el hombre en la atmósfera. Por un lado, el óxido nítrico (NO) y, por otro, el dióxido de nitrógeno (NO₂). Su emisión se produce a partir de la combustión que provoca la combinación del oxígeno y el nitrógeno, produciendo NO, que, en reacciones fotoquímicas, produce la oxidación del NO₂.

Las principales fuentes de emisión son los automóviles de gasolina y diésel, siendo estos últimos los que más contribuyen. En menor medida, otras instalaciones como las calefacciones en las que se produce combustión, también se suman a la emisión (Agencia de Salud Pública de Barcelona, 2016).

El NO₂ tiene establecido valores límites en períodos de exposición de corta y larga duración. El Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire y la directiva europea 50/2008/CE establecen, desde el año 2010, valores límite de protección para la salud.

De manera horaria, el valor límite lo encontraríamos en 200 µg/m³, que no podrá superarse más de 18 horas al año, así como el valor límite anual que se sitúa en los 40 µg/m³. Existe, además, un límite de alerta de 400 µg/m³, en caso de superarse durante tres horas consecutivas en la ciudad (Boletín Oficial del Estado, 2011).

- Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂, en condiciones ambientales de temperatura y presión es un gas incoloro. Desde mitad del S.XIX ha sido, en combinación con otras partículas, el causante de la aparición de un tipo de smog en muchas ciudades industriales, el smog ácido.

La fuente de emisión del SO₂, se produce a partir de la combustión del azufre en combustiones fósiles como el carbón o el petróleo crudo pesado. No obstante, existen también fuentes de emisión naturales a partir de los volcanes u océanos, que suponen alrededor del 2% del total. Además, después de ser emitido en la atmósfera es posible que se produzca la oxidación a sulfatos y ácido sulfúrico, pudiendo recorrer largas distancias y contribuir a la formación de lluvia ácida (Barnes. et al., 1997).

- Ozono (O₃)

El ozono es considerado como un gas reactivo, irritante y oxidante. Es uno de los contaminantes secundarios mayoritarios, lo que significa que no es emitido de manera directa. Se forma en la baja troposfera a partir de otros contaminantes como los NO o NO₂ y compuestos orgánicos volátiles en presencia de radiación solar (Agencia de Salud Pública de Barcelona, 2016).

Existe, además, una relación entre las condiciones meteorológicas y la concentración de ozono, siendo la misma más elevada en condiciones de altas temperaturas y situación meteorológica en calma, con ausencia de viento (Khiem et al., 2010).

Las altas concentraciones de ozono en la troposfera pueden provocar efectos nocivos para la salud, dependiendo de la exposición, sensibilidad y grado de actividad física de cada persona (Agencia Catalana de Salud Pública de Barcelona, 2016). El Real Decreto 102/2011 determina diferentes umbrales de actuación en caso de altas concentraciones. Por un lado, un umbral de información si el promedio horario es superior a 180 µg/m³, mientras que existe un umbral de alerta si la superación de 240 µg/m³ es durante tres horas consecutivas (Boletín Oficial del Estado, 2011).

- Partículas en suspensión (PM)

Producidas principalmente por el tráfico de vehículos, las partículas en suspensión es otro de los elementos contaminantes habituales en áreas urbanas.

Los tamaños de las partículas en suspensión pueden variar hasta cuatro órdenes de magnitud, desde pocos nanómetros hasta decenas de micrómetros. Las más pequeñas, de menos de 0,1 μg se forman por condensación de sustancias por altas temperaturas o reacciones químicas en la atmósfera. Por ello, se clasifican según su tamaño. Las PM₁₀, son las partículas inferiores a 10 μm y las PM_{2,5} tienen un diámetro igual o inferior a 2,5 μm siendo las que pueden llegar, a la hora de respirar, hasta los pulmones (Agencia de Salud Pública de Barcelona, 2016).

Para las PM₁₀ el valor límite diario se sitúa en las 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, determinando que no se podrá superar en más de 35 ocasiones por año. La media anual límite se sitúa en los 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de las PM_{2,5} el límite anual se sitúa en los 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo el valor medio anual límite de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Boletín Oficial del Estado, 2011).

Las PM provocan efectos negativos en la salud, afectando principalmente al aparato respiratorio y cardiovascular, siendo las personas con más edad, niños y aquellos con enfermedades cardíacas o pulmonares las más afectadas (Agencia de Salud Pública de Barcelona, 2016).

2.3. Efectos de la contaminación

2.3.1 En la salud de la población

Numerosos estudios han determinado que la exposición prolongada a concentraciones de contaminantes favorece la aparición de enfermedades tanto respiratorias como cardiovasculares. Por ejemplo, una exposición prolongada a las PM₁₀ u ozono pueden provocar inflamaciones locales en el aparato respiratorio, e incluso, problemas en la coagulación (Chuang et al., 2006).

Probablemente uno de los contaminantes más peligrosos para la salud de la población sean las PM. De hecho, éstas pueden actuar de manera negativa en diferentes órganos o funciones del cuerpo. La inhalación de PM, siempre de manera prolongada, puede provocar la reducción de las funciones pulmonares, incrementar la coagulación, alterar el ritmo cardíaco, provocar un incremento de la isquemia mitocondrial o incluso cerebrovascular (Arden y Dockery, 2006).

No obstante, no podemos dejar de lado el efecto de otros contaminantes. El dióxido de azufre (SO₂) puede provocar problemas en la capacidad respiratoria, disminuyéndola

considerablemente. El dióxido de nitrógeno (NO₂) puede favorecer la aparición de asma, siendo las personas de temprana edad los más afectados, pudiendo provocar enfermedades respiratorias crónicas.

El monóxido de carbono (CO) puede favorecer la aparición de daños neurológicos o cognitivos, aumentando el déficit de coordinación o vigilancia.

Por último, el ozono también afecta claramente a la función pulmonar disminuyéndola considerablemente e, incluso, agravando enfermedades respiratorias preexistentes (Schwela, 2000).

Además, algunos autores han determinado que los efectos sobre la salud pueden variar en función de los niveles de un determinado contaminante. En el caso del dióxido de azufre (SO₂), se determinan diferentes efectos en función de la concentración. Una concentración entre los 200µg/m³ a 250µg/m³ puede provocar efectos moderados, tales como una disminución ligera y transitoria de la función pulmonar en niños y adultos o un aumento de la morbilidad respiratoria entre adultos susceptibles. Con concentraciones entre 400 a 500µg/m³, se pueden producir mayores incrementos en la morbilidad respiratoria, así como un aumento de la mortalidad entre ancianos y enfermos crónicos (Ballester et al., 1999).

Debido a todos estos efectos y las consecuencias de la exposición a concentraciones elevadas de diversos contaminantes, se han empezado a regular y a actuar en caso de situaciones de riesgo, tal y como se explicará más adelante.

2.3.2. En la vegetación

Los altos niveles de concentración de contaminantes en la atmósfera no solo afectan la salud humana, sino que también afectan al resto de organismos vivos, como la vegetación. En este caso, uno de los contaminantes potenciales que afecta en mayor medida es el ozono.

La afectación dependerá de la cantidad de ozono que consigue alcanzar el interior del organismo vegetal, afectando las reacciones bioquímicas y metabólicas y alterando el desarrollo vegetal. La cantidad de ozono que llega a afectar a la planta será proporcional a la concentración que hay en el aire, siempre teniendo en cuenta que durante el proceso

de transporte de la atmósfera a la parte más próxima al tejido vegetal se perderá cierta concentración de ozono.

El ozono en las especies vegetales provoca efectos tales como la disminución de la actividad fotosintética, una reducción neta de la tasa de asimilación del carbono e, incluso, puede llegar a alterar las relaciones de competencia entre especies y un cambio en la comunidad vegetal (Abellan et al., 2009).

No obstante, la vegetación juega un papel muy interesante respecto a la contaminación atmosférica. Las especies vegetales son capaces de filtrar, en función de su tamaño, determinadas cantidades de aire y partículas, favoreciendo el filtrado del aire contaminado (Svensson et al., 1997).

De acuerdo con Bernatzky (1983), la localización de las especies vegetales es crucial para la mayor o menor captación de aire contaminado. Por ejemplo, en parques urbanos la capacidad de captación y filtración asciende hasta el 85%, o también en calles con presencia de especies vegetales, principalmente árboles, donde dicha capacidad alcanza el 70%. Además, la presencia de especies arbóreas ayuda a la micro regulación climática. Estudios realizados en la ciudad de Chicago mostraron que, incrementando un 10% la presencia de árboles en calles, se conseguía disminuir considerablemente la energía total empleada para sistemas de calefacción o aire acondicionado (McPherson et al., 1997).

Asimismo, la vegetación ayuda a la reducción del ruido producido por las diferentes actividades realizadas en la ciudad, contribuyendo a un buen drenaje del agua de lluvia, así como de las aguas residuales (Bolund y Hunhammar, 1999).

2.3.3. En el tiempo y clima

Otro de los efectos estudiados de la contaminación urbana es en el tiempo y en el clima, así como en sus procesos.

Uno de los contaminantes de los que más se ha estudiado su impacto en estos ámbitos son los aerosoles. Los aerosoles pueden tener un impacto en el clima global en varios aspectos. Por un lado, absorbiendo y reflejando radiación solar. Además, pueden alterar las características microfísicas de la formación de nubes, la formación de partículas precipitables e, incluso, las características de la nube, como por ejemplo su albedo (Levin y Cotton, 2008).

Los aerosoles pueden afectar la precipitación a través de diferentes procesos. Por un lado, los efectos radioactivos pueden provocar la reducción o eliminación de la precipitación, ya que disminuye la cantidad de radiación solar y, por consiguiente, la capacidad calorífica que puede favorecer la evaporación o convección (Qian et al., 2009).

Otro de los fenómenos que los contaminantes pueden producir a una escala regional, es la lluvia ácida. Este fenómeno se produce cuando las nubes contienen y transportan contaminantes que se depositan en las gotas de lluvia, nieve, rocío o niebla. Se determina a partir de cambios en el pH natural. El impacto de la lluvia ácida sobre los diferentes ecosistemas puede tener consecuencias muy graves. Por ejemplo, puede provocar dificultades en peces, deterioro de suelos e, incluso, la muerte de especies vegetales. Obviamente, la lluvia ácida también contribuye al deterioro de algunas superficies como el mármol o caliza.

Climáticamente es bien conocido que las concentraciones de ciertos contaminantes favorecen el efecto invernadero en el que se produce un calentamiento adicional de la temperatura de la tierra. En este caso, la escala deja de ser local o regional para pasar a ser global. En este aspecto, el gas más importante es el dióxido de carbono. Éste, ha aumentado considerablemente a partir de la utilización de combustibles fósiles junto al incremento de otros gases como los CFCs o los óxidos de nitrógeno. Este efecto invernadero reforzado antrópicamente por la contaminación tiene consecuencias como el incremento de la temperatura global que puede provocar reacciones en cadena como el deshielo, el aumento del nivel del mar o cambios en la productividad biológica (Martínez y Díaz de Mera, 2004).

2.4. Medición y control de la contaminación

Actualmente la medición y el control de la contaminación atmosférica urbana es un aspecto muy habitual. Las ciudades han instalado diferentes estaciones de medición automática y manual, que se complementan con diferentes centros de análisis encargados de la validación de datos y de su posterior análisis.

Las mediciones automáticas, tal y como su nombre indica, no necesitan intervención humana para la medición. Las estaciones automáticas filtran el aire reteniendo partículas y midiendo la cantidad de un determinado contaminante. Dichas estaciones de medida

siguen una normativa vigente, en nuestro caso, la normativa europea que indica las características técnicas que dichas estaciones deben tener. Por ejemplo, los equipos de medición deben estar instalados en recintos donde la temperatura sea más o menos estable y constante, rondando los 20 y 25 grados. Los equipos automáticos permiten un análisis inmediato de la situación, aunque para determinadas sustancias se requieren otros procedimientos más complejos (Generalitat de Catalunya, 2018).

Las mediciones manuales son aquellas que se realizan con aparatos que permiten obtener muestras para posteriormente ser analizadas en laboratorio. Estas mediciones pueden tener más desventajas respecto a las automáticas, ya que los resultados y análisis no son inmediatos (Puigcerver y Carrascal, 2008). En la figura 1 se pueden observar los ejemplos de un captador manual para partículas (PM10) y una estación automática de medición de la contaminación.



Figura 1. Ejemplo de instrumento manual para la medición de PM10 y ejemplo de estación automática de medición de contaminación (Fuente: Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya).

Cada contaminante es muestreado a partir de diferentes métodos. Por ejemplo, para el SO₂ se realiza la fluorescencia ultravioleta, para el NO₂ o NO_x la quimioluminiscencia, para el CO la espectrometría infrarroja no dispersiva o para las PM10 métodos como gravimetría, absorción de la radiación beta o la dispersión ortogonal de luz (Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya, 2018).

2.5. Normativa vigente sobre la contaminación

La contaminación atmosférica ha sido tratada a través de diferentes normativas y acuerdos prácticamente a todas las escalas. Las más importantes y que nos competen en este caso, son la europea y la española.

La normativa europea en vigor, representada por la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa determina nuevas regulaciones para los diferentes contaminantes. La normativa plantea los siguientes valores límite para la protección de la salud humana de diferentes contaminantes.

En el caso del dióxido de azufre (SO_2), para la protección de la salud, el umbral superior de evaluación será el 60% del valor límite diario ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin poderse superar más de 3 veces por año), siendo el umbral inferior del 40% del valor límite diario ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin poderse superar más de 3 veces por año). En el caso de protección de la vegetación será el umbral superior del 60% del nivel crítico de invierno ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el inferior del 40% del nivel crítico de invierno ($8 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Adicionalmente, la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, determina umbrales de alerta para el dióxido de azufre (SO_2) a partir de los $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el dióxido de nitrógeno (NO_2) a partir de los $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además de umbrales de información del ozono (O_3) a partir de los $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un período medio de una hora y umbrales de alerta, si se supera en ese mismo período los $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Directiva 2008/50/CE también plantea niveles límite para la protección de la vegetación, con el planteamiento de niveles críticos de dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (tablas 1 y 2).

Período medio	Valor límite
Anual e invierno (1 de octubre al 31 de marzo)	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 1. Umbrales límite para el SO_2 en la Directiva 2008/50/CE.

Período medio	Valor límite
Anual	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NOx

Tabla 2. Umbrales límite para los NOx en la Directiva 2008/50/CE.

A nivel estatal, el Real Decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, benceno, monóxido de carbono, plomo y partículas determina los umbrales máximos para los distintos contaminantes que se incluyen en las tablas 3 a 8.

Período medio	Valor límite
1 hora	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin poder superarse más de 24 veces por año.
1 día	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin poder superarse más de 3 veces por año.

Tabla 3. Umbrales límite para el SO2 en el Real Decreto 1073/2002

Período medio	Valor límite
1 hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin poder superarse más de 18 veces por año.
Anual	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 4. Umbrales límite para el NO2 en el Real Decreto 1073/2002.

Período medio	Valor límite
Anual	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 5. Umbrales límite para el benceno (C₆H₆) en el Real Decreto 1073/2002.

Período medio	Valor límite
Máxima diaria de las medias móviles octohorarias	10 mg/m ³

Tabla 6. Umbrales límite para el monóxido de carbono (CO) en el Real Decreto 1073/2002.

Período medio	Valor límite
Anual	0,5 µg/m ³

Tabla 7. Umbrales límite para el plomo (Pb) en el Real Decreto 1073/2002.

Período medio	Valor límite
1 día	50 µg/m ³ , sin poder superarse más de 35 veces por año.
Anual	40 µg/m ³

Tabla 8. Umbrales límite para las partículas (PM10) en el Real Decreto 1073/2002.

Además, la normativa española está definida a partir de dos normas. Por un lado, la Ley 34/2007, de 15 de noviembre de calidad del aire y protección de la atmósfera, y el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, que pretende alcanzar niveles óptimos de calidad del aire con el fin de evitar efectos nocivos sobre la salud humana y medio ambiente (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2018).

En la escala más local, como es la relacionada con este TFG, el Ayuntamiento de Barcelona presenta una normativa municipal contra la contaminación atmosférica. El ayuntamiento pone en marcha en caso de altos niveles de contaminación en la ciudad diferentes protocolos y medidas a adoptar, así como planes de movilidad urbana sostenible (Ajuntament de Barcelona, 2018).

El plan de movilidad urbana sostenible, tiene como objetivo la mitigación de la contaminación y la disminución de episodios de NO₂. Para ello, la ciudad realiza acciones que afectan a todos los transportes posibles efectuados en la ciudad. Por ejemplo, ampliando y mejorando la red de itinerarios de bicicletas, aumentando los aparcamientos de las mismas en la vía pública, mejorar el servicio de líneas de autobús, así como carriles específicos para este tipo de transporte o mejoras más pequeñas como proporcionar información en tiempo real sobre el estado de la red de transportes o hacer una divulgación de la movilidad sostenible y segura (Ajuntament de Barcelona, 2018).

Además, en el caso de la declaración de episodio de contaminación por dióxido de nitrógeno (NO₂), el ayuntamiento pone en marcha la restricción de circulación dentro de la Zona de Bajas Emisiones del ámbito de las Rondas de Barcelona a determinados tipos de turismos, como se especifica en el siguiente apartado. Se pretende que a partir del año 2025, se prohíba permanentemente la circulación dentro del área metropolitana de todos los vehículos sin etiqueta de la DGT (Ajuntament de Barcelona, 2018).

2.6. Medidas de reducción de la contaminación

Como se ha visto anteriormente, una de las posibles medidas de reducción de la contaminación es la creación de leyes y restricciones planteadas a diferentes escalas. No obstante, más allá del ámbito político o legislativo, se han estudiado acciones que pueden ayudar a la reducción de altas concentraciones de contaminantes.

Uno de los pilares fundamentales en que organizaciones e instituciones intentan fomentar hábitos más respetuosos con el medio ambiente es en el uso del vehículo privado. Hay consenso en que una de las formas de mitigar la contaminación podría ser la utilización del transporte público frente al vehículo privado e, incluso, optar por realizar los desplazamientos en distancias cortas, a pie (National Pollutant Inventory, Australian Government, 2018).

Además, en algunas ciudades como Barcelona, se empiezan a realizar restricciones con aquellos vehículos considerados como altos contaminantes, fomentando el uso de vehículos eléctricos. De hecho, desde el año 2017 los vehículos se identifican según si son más o menos respetuosos con el medio ambiente. Estos distintivos se clasifican en cinco apartados: por un lado, los vehículos que no cumplen los requisitos ambientales

considerados mínimos y que no tienen etiqueta. La etiqueta B, de color amarillo para turismos y vehículos comerciales ligeros, matriculados principalmente a partir de 2003. La etiqueta C, de color verde para turismos matriculados a partir de 2007. La etiqueta ECO, de color verde y azul para turismos híbridos, vehículos propulsados por gas natural, gas natural comprimido o gas licuado del petróleo, además de las motos y ciclomotores con categoría eléctrica. Y, por último, la etiqueta cero emisiones, de color azul, para vehículos eléctricos o vehículos híbridos con autonomía mínima de 40km o vehículos de pila de combustible. Por lo tanto, esto permite la adecuada gestión en episodios de alta contaminación (Ajuntament de Barcelona, 2017).

Aparte del control de la contaminación procedente de la combustión en vehículos, se fomentan otras prácticas respetuosas con el medio ambiente. Por ejemplo, utilizar bombillas de bajo consumo, un buen uso de aparatos de climatización, así como su mantenimiento para un uso eficiente (Ajuntament de Barcelona, 2017).

Las actividades industriales de empresas también deben adaptar sus actividades para reducir el impacto medioambiental. Por ejemplo, deben cumplir la legislación vigente, con un control de los residuos provocados, así como su adecuada separación, prevención y control de fugas, la inspección y revisión periódica de sus instalaciones y la formación de sus trabajadores. Para ello se deben realizar auditorías que identifiquen el estado de cumplimiento de la normativa medioambiental, como por ejemplo la Norma ISO 14001, analizando diferentes aspectos como las emisiones o los residuos sólidos, para posteriormente realizar un diagnóstico y unas medidas correctoras o de vigilancia. Por último, se debe publicar un informe ambiental (Rubio, 2014).

2.7. Las condiciones meteorológicas y la contaminación

La contaminación atmosférica puede tener efectos directos en las condiciones meteorológicas, siendo posible, prácticamente, a cualquier escala. En consecuencia, los efectos de la contaminación atmosférica pueden ser clasificados según su escala como locales, regionales y globales (Puigcerver y Carrascal, 2008).

Entre los efectos locales se encuentra la reducción de la visibilidad. Las concentraciones elevadas de contaminantes, principalmente de aerosoles, provocan una disminución drástica de la distancia máxima a la cual un objeto es apreciable. A escala local también

se puede producir la atenuación de la radiación solar, producida exclusivamente por aerosoles, provocando la disminución de irradiación en sectores con altas concentraciones de dichos contaminantes.

En este aspecto, diferentes estudios han constatado que la presencia de grandes cantidades de aerosoles, contribuyen a la reducción de la radiación solar obtenida. De hecho, un estudio realizado en la Ciudad de México determinó que, en condiciones atmosféricas estables durante la época más seca del año, en la que la concentración de aerosoles es mayor, se obtuvo la misma irradiación solar que durante la época más inestable y lluviosa (Jáuregui y Luyando, 1999).

En ciudades con concentraciones elevadas la contaminación puede provocar el incremento del efecto de isla de calor urbana, consistente en una temperatura superior a las zonas rurales de alrededor, producida principalmente por las actividades urbanas e industriales (calefacciones, industria, vehículos privados...), entre otras causas (Moreno García, 2010).

Por último, en la escala local, también puede producir otro fenómeno negativo en las áreas urbanas, que son los olores. Éstos son producidos por la mezcla de sustancias emitidas a la atmósfera y que varían en función de factores meteorológicos como temperatura, humedad o dirección del viento y locales como la topografía y el tipo de entorno.

A escala regional el efecto principal es la conocida como lluvia o deposición ácida. Los SO_2 , NO_x , HCl y sus transformaciones químicas son los contaminantes capaces de acidificar y producir el fenómeno. Son deposiciones ácidas provenientes de la atmósfera (la mayor parte en forma gaseosa o de partículas), que tienen efectos negativos en la vegetación, los ecosistemas, materiales, etc. (Puigcerver y Carrascal, 2008). Por lo que se refiere a la salud, la lluvia ácida también tiene diferentes efectos negativos para la población. Diversos estudios realizados han determinado que enfermedades respiratorias crónicas pueden aparecer después de que se produzca el fenómeno debido a la exposición e inhalación de partículas y gases ácidos. Además, uno de los efectos más importantes se produce con la acidificación del agua, ya que aumenta considerablemente la exposición a elementos tales como el mercurio, cadmio o aluminio (Goyer et al., 1985).

A escala global se podría hablar de otros efectos como el famoso efecto invernadero, provocado por la acumulación de gases en la atmósfera y que se convierte en un problema global, facilitando el aumento de la temperatura media global y el agujero de ozono en la Antártida (Puigcerver y Carrascal, 2008).

3. ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN SINÓPTICA DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN BARCELONA DURANTE EL AÑO 2017

3.1 El área de estudio y las estaciones empleadas

La ciudad de Barcelona se encuentra a orillas del mar Mediterráneo, a una latitud de 41° N y una longitud de 2° E. Se trata de una de las ciudades españolas más importantes, con un total de 1.620.809 habitantes (2017). De clima templado, más concretamente, según la clasificación climática de Köppen, de clima mediterráneo (Csa). Este clima se caracteriza por veranos secos y cálidos, ya que la media del mes más cálido es superior a los 22°C, con lluvias concentradas en el otoño y un invierno con temperaturas suaves.

La realización de este estudio se llevará a cabo, por una parte, a partir de los datos proporcionados por las estaciones automáticas de la contaminación que hay distribuidas a lo largo del municipio, pertenecientes a la *Xarxa de Vigilància i Previsió de la Qualitat del Aire (XVPCA)* de la Generalitat de Catalunya. Las estaciones empleadas han sido siete, de las que se indica seguidamente una descripción.

- Parc de la Vall d'Hebrón (figura 2): situada en el distrito de Horta-Guinardó, a una altura de 136 msnm, fue inaugurada en el año 2008. Está catalogada como una estación urbana de fondo, alejada del propio centro de la ciudad. En esta estación se efectúan mediciones de As, C₆H₆, Cd, Ni, Pb, PM₁₀ y PM_{2.5}, manualmente, y de CO, NO, NO_x, NO₂, O₃ y SO₂, de forma automática.



Figura 2. Estación automática de la Vall d'Hebrón
(Fuente: Generalitat de Catalunya).

- Palau Reial (figura 3): situada en el distrito de Les Corts, a una altura de 81 msnm e inaugurada en marzo del 2011. Al igual que la del Parc de la Vall d'Hebron, está catalogada como urbana de fondo. Encontramos, de nuevo, dos métodos de captación: manual y automático. Las mediciones manuales corresponderían a las PM10, mientras que las automáticas serían las correspondientes al CO, NO, NO_x, NO₂, O₃, PM2.5 y SO₂.



Figura 3. Estación automática de Palau Reial
(Fuente: Generalitat de Catalunya).

- Gràcia-Sant Gervasi (figura 4): situada entre los distritos de Gracia y Sarrià-Sant Gervasi, a una altura de 57 msnm, desde el año 1982. Catalogada como urbana de tránsito, ya que se localiza en una zona céntrica y con mayor tráfico urbano. Las mediciones manuales corresponderían al As, C₆H₆, Cd, Ni, Pb y PM10 y en el caso de las automáticas al CO, NO, NO_x, NO₂, O₃, PM10 y SO₂.



Figura 4. Estación automática de Gràcia-St Gervasi
(Fuente: Generalitat de Catalunya).

- Sants (figura 5): situada en el distrito de Sants-Montjuic, a una altura de 35 msnm. Catalogada como urbana de fondo, encontramos mediciones manuales de As, C₆H₆, Cd, Ni, Pb y PM₁₀, además de automáticas como los NO, NO_x o NO₂. Su puesta en funcionamiento fue en el año 1986.



Figura 5. Estación automática de Sants (Fuente: Generalitat de Catalunya).

- Eixample (figura 6): situada en el distrito de l'Eixample a una altura de 26 msnm, con mediciones desde el año 1984. Categorizada como una estación en área urbana de tránsito. Las mediciones de captador manual las encontramos en los datos de As, C₆H₆, Cd, Ni, Pb, PM_{2.5} y PM₁₀. Las automáticas en los de CO, NO, NO_x, NO₂, O₃, PM₁₀ y SO₂.



Figura 6. Estación automática de Eixample (Fuente: Generalitat de Catalunya).

- Ciutadella (figura 7): situada en el distrito de Ciutat Vella, a una altura de 7 msnm e instalada en el año 2004. Catalogada como urbana de fondo. En este caso, todas las medidas son por analizadores automáticos, limitándose a NO, NO_x, NO₂ y O₃.



Figura 7. Estación automática de Ciutadella (Fuente: Generalitat de Catalunya).

- Poblenou (figura 8): situada en el distrito de Sant Martí a una altura de 3msnm, fue instalada en el año 1982 y está catalogada como urbana de fondo. Realiza mediciones de captador manual de As, C₆H₆, Cd, Ni, Pb, PM10, PM2.5 y automáticas de NO, NO_x, NO₂ y PM10.



Figura 8. Estación automática de Poblenou. (Fuente: Generalitat de Catalunya).

En la tabla 9 se recoge de manera resumida la información básica sobre las estaciones, así como los contaminantes medidos en cada una de ellas.

GRÀCIA –						
VALL D'HEBRON	PALAU REIAL	ST. GERVASI	SANTS	EIXAMPLE	CIUTADELLA	POBLENOU
136msnm	81msnm	57msnm	35msnm	26msnm	7msnm	3msnm
2008	2011	1982	1986	1984	2004	1982
As, C ₆ H ₆ , Cd, Ni, Pb, CO, NO, NO _x , NO ₂ , O ₃ , SO ₂	CO, NO, NO _x , NO ₂ , O ₃ , PM2.5, PM10, SO ₂	As, C ₆ H ₆ , Cd, Ni, Pb, CO, NO, NO _x , NO ₂ , O ₃ , PM2.5, PM10, SO ₂	As, C ₆ H ₆ , Cd, Ni, Pb, PM10, NO, NO _x , NO ₂	As, C ₆ H ₆ , Cd, Ni, Pb, PM2.5, PM10, CO, NO, NO _x , NO ₂ , O ₃ , SO ₂	NO, NO _x , NO ₂ , O ₃	As, C ₆ H ₆ , Cd, Ni, Pb, PM2.5, PM10, NO, NO _x , NO ₂ , O ₃

Tabla 9. Información básica y contaminantes analizados de cada estación automática (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 9 puede apreciarse el mapa elaborado con indicación de la localización de cada una de las estaciones de contaminación, diferenciándolas por colores.

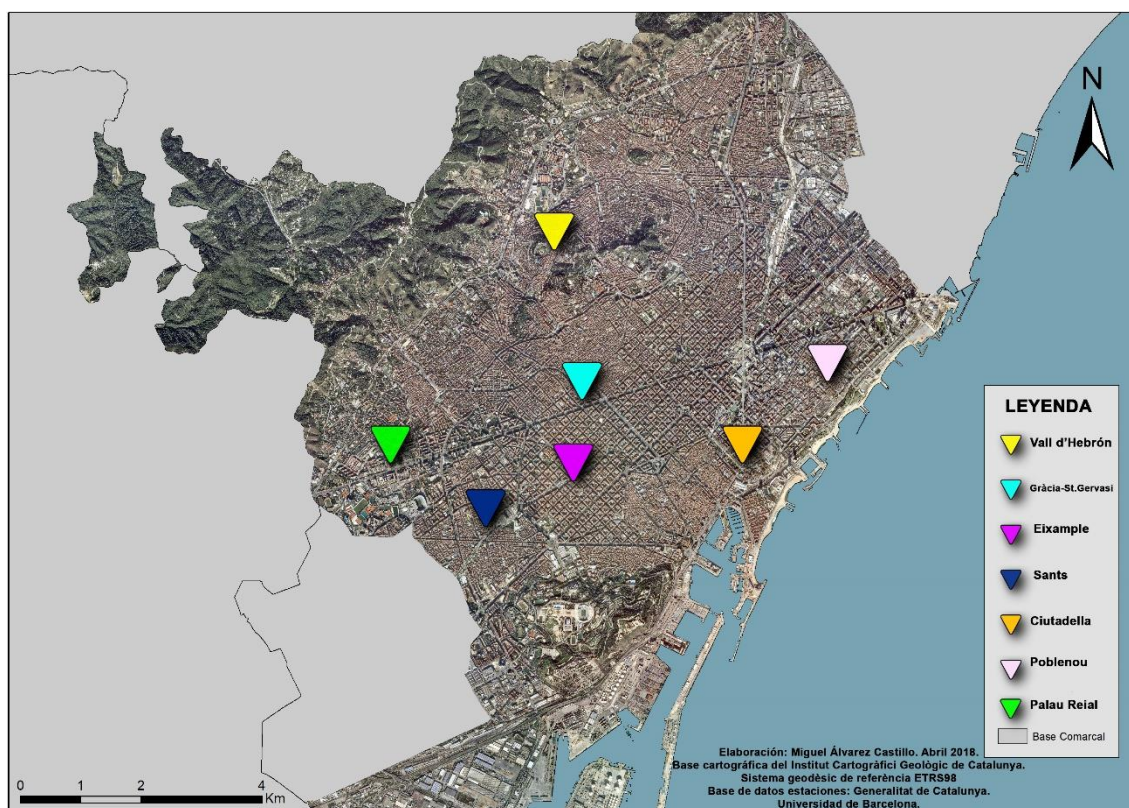


Figura 9. Mapa con la localización de las estaciones automáticas de contaminación en la ciudad de Barcelona (Fuente: elaboración propia a partir de datos del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya y de la Generalitat de Catalunya).

3.2. Estudios sobre contaminación atmosférica en la ciudad de Barcelona

Han sido diversos los estudios que han tratado esta temática, focalizándose en la ciudad de Barcelona y su área metropolitana. Algunos han tratado la relación entre contaminación y meteorología, mientras que otros se han centrado en episodios relevantes de contaminación o, incluso, en los efectos en la salud.

Según Clavero (1990) los factores meteorológicos son claves para explicar la acumulación de contaminantes en la ciudad, siendo las situaciones de estabilidad atmosférica las que propician dicha acumulación. Al analizar las situaciones sinópticas en Barcelona para diferentes meses del año 1985, observó que las situaciones anticiclónicas y de pantano barométrico presentaron unas concentraciones moderadas de contaminantes, mientras que en situaciones de inestabilidad como las de gota fría o las depresiones se produce un descenso considerable de la concentración de contaminantes. Cabe destacar que una de las situaciones que produce la mayor cantidad de concentración es la de la inversión térmica (Clavero, 1990).

También ha sido estudiada la relación entre la concentración de contaminación y el transporte público. Se ha determinado que durante los días de huelga que afectan a los diferentes transportes públicos de la ciudad (metro, tren y bus), la concentración aumenta considerablemente. De hecho, durante las huelgas parciales de metro se han detectado un 30% más de carbono negro, un aumento del 60% de NO y un 80% de CO en algunas estaciones de medición. Además, estos valores pueden ser superiores en huelgas que han afectado la totalidad del servicio durante toda la jornada. Se determinó que el metro, en concreto, es el transporte público que, en días de huelga, provoca un aumento de la contaminación, debido a que gran parte de la población de Barcelona realiza sus traslados en este medio de transporte (Basagaña et.al., 2017).

Como ya se ha señalado con anterioridad, la contaminación atmosférica tiene una incidencia negativa en la salud humana. Sobre este aspecto, también se han realizado estudios específicos para la ciudad de Barcelona. Se ha encontrado una relación significativa entre altas concentraciones de SO₂ y casos de mortalidad cardiovascular o enfermedades respiratorias, afectando mayoritariamente a las personas de avanzada edad. Además, la asociación entre SO₂ y mortalidad respiratoria es mayor en el verano que en el invierno, probablemente debido a la mayor exposición durante los meses de verano que no durante la época invernal. No obstante, otros contaminantes también fueron tratados,

observando que el NO₂ no mostraba una relación significativa con la mortalidad respiratoria (Sunyer et al., 1996).

También ha sido analizada la contaminación en diferentes escuelas de Barcelona, así como de otras zonas próximas como Sant Cugat. Algunos trabajos han constatado que las mayores concentraciones se encuentran en los patios de recreo, así como en el interior de las clases. Se determinó que, por ejemplo, las PM 2.5, en concreto, son superiores en los patios del colegio y en el interior de las aulas que no fuera de ellas, explicándose por la contribución de tierra o arena propia de estas instalaciones. Además de ello, se determinó que los alumnos de aquellos colegios céntricos y con patios exteriores están expuestos alrededor de un 20% más a la polución producida por el tráfico (Rivas et al., 2014).

3.3. Evolución mensual de los contaminantes en la ciudad

A continuación, se analiza la evolución durante el año 2017 de los valores medios mensuales de cada contaminante calculados a partir de los datos diarios proporcionados por el Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya. Después de calcular los promedios mensuales de cada contaminante en cada una de las estaciones automáticas, se han representado gráficamente en las figuras 10 a 15 para facilitar su análisis.

El monóxido de carbono (CO) es monitorizado por cuatro de las siete estaciones automáticas de la ciudad de Barcelona: las de Eixample, Gràcia–St. Gervasi, Palau Reial y Vall d’Hebron. Generalmente, las estaciones más céntricas registran valores más elevados, como por ejemplo Eixample o Gràcia–St. Gervasi, en contraste con Vall d’Hebron, que es la que registra concentraciones medias menos elevadas durante gran parte del año.

Como puede observarse en el gráfico de la figura 10, el CO suele tener sus mínimos en los meses estivales, ya que de forma general todas las estaciones registran las concentraciones más bajas. A partir de septiembre vuelve a aumentar teniendo un repunte claro durante el mes de noviembre.

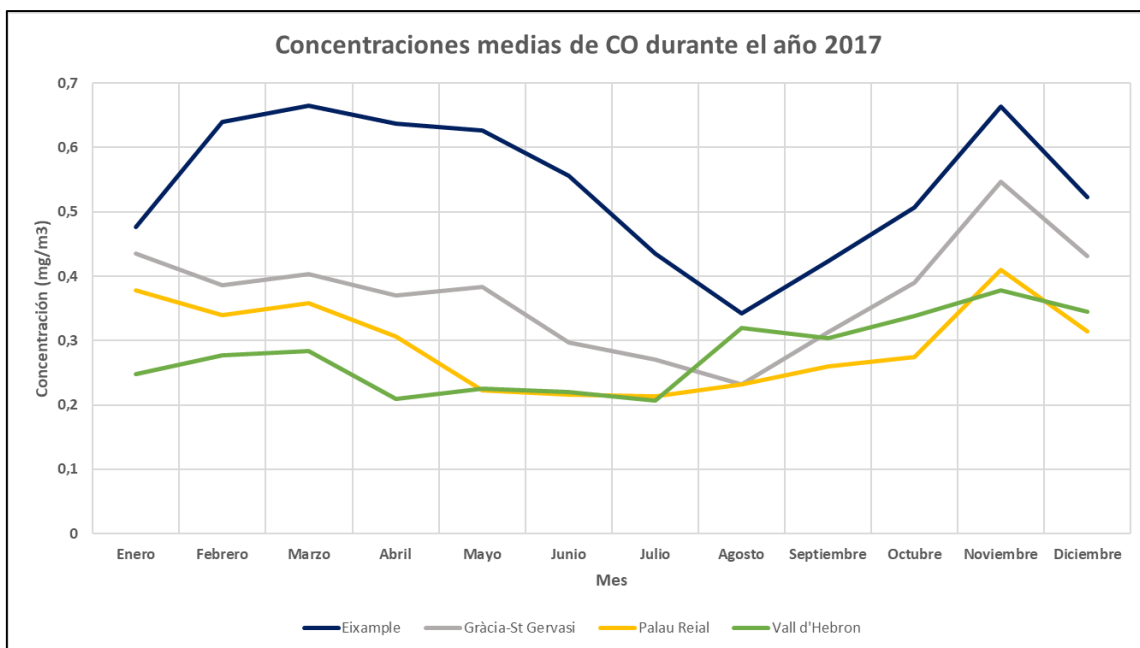


Figura 10. Evolución de los valores medios mensuales del monóxido de carbono (CO) en Barcelona durante el año 2017 (Fuente: elaboración propia).

También son destacables los valores en primavera, principalmente de la estación del Eixample. Probablemente esto es debido a la mayor concurrencia en el centro de la ciudad, en desplazamientos por motivos laborales. Como se ha podido ver con anterioridad, el monóxido de carbono (CO) es producido por el tráfico, por lo tanto, esto explica el por qué las estaciones céntricas tienen valores más elevados.

La disminución de las concentraciones medias durante los meses estivales puede explicarse debido al efecto contrario, la disminución de los traslados en vehículo privado. Por lo general, son meses libres para muchas personas en los que no realizarán dichos traslados por coincidir con las vacaciones de verano. De hecho, con la finalización del periodo estival, las concentraciones vuelven a aumentar durante el otoño e invierno.

El dióxido de nitrógeno (NO₂), a diferencia del monóxido de carbono (CO), es monitorizado por la totalidad de las estaciones automáticas de la ciudad. Por lo general, prácticamente todas siguen un mismo patrón, siendo la de Eixample la que tiene valores más elevados durante todo el año, lejos de las que menos concentración registran que son las de Palau Reial y Poblenou.

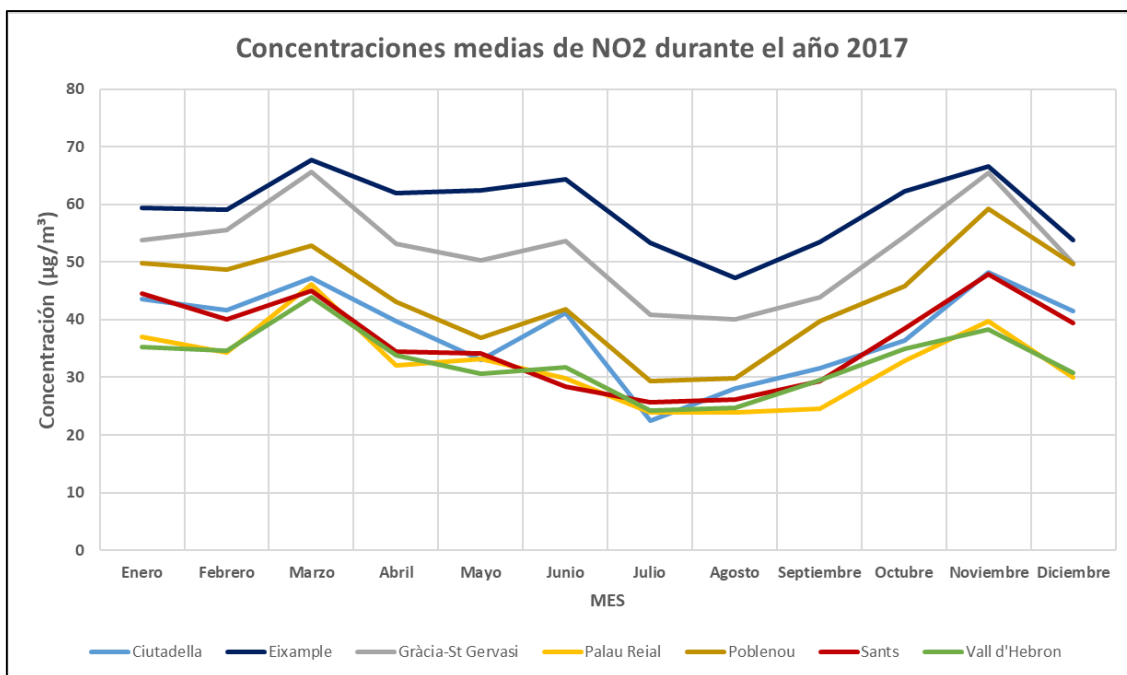


Figura 11. Evolución de los valores medios mensuales del dióxido de nitrógeno (NO₂) en Barcelona durante el año 2017 (Fuente: elaboración propia).

Parece, pues, que la concentración depende, en gran parte, de la situación respecto al centro de la ciudad y, por lo tanto, donde se produce más movimiento de vehículos privados. De hecho, los valores de concentración disminuyen del centro a la periferia o a zonas menos transitadas.

Como se observa en la figura 11 durante los meses estivales las concentraciones disminuyen, siendo el mes de agosto el mes con menos concentración en prácticamente la totalidad de las estaciones. No obstante, se producen dos repuntes en todas las estaciones automáticas, en marzo y de nuevo y coincidiendo con el anterior contaminante, en noviembre.

El óxido de nitrógeno, es medido por todas las estaciones automáticas. No obstante, la estación de Vall d'Hebron presentaba valores anómalos, por lo que se ha decidido excluirla del análisis.

Como se comprueba en la figura 12, la estación del Eixample vuelve a ser la que presenta más concentración de manera general a lo largo del año. Durante los meses estivales la concentración disminuye, registrándose en muchos casos el mínimo absoluto en el mes de agosto.

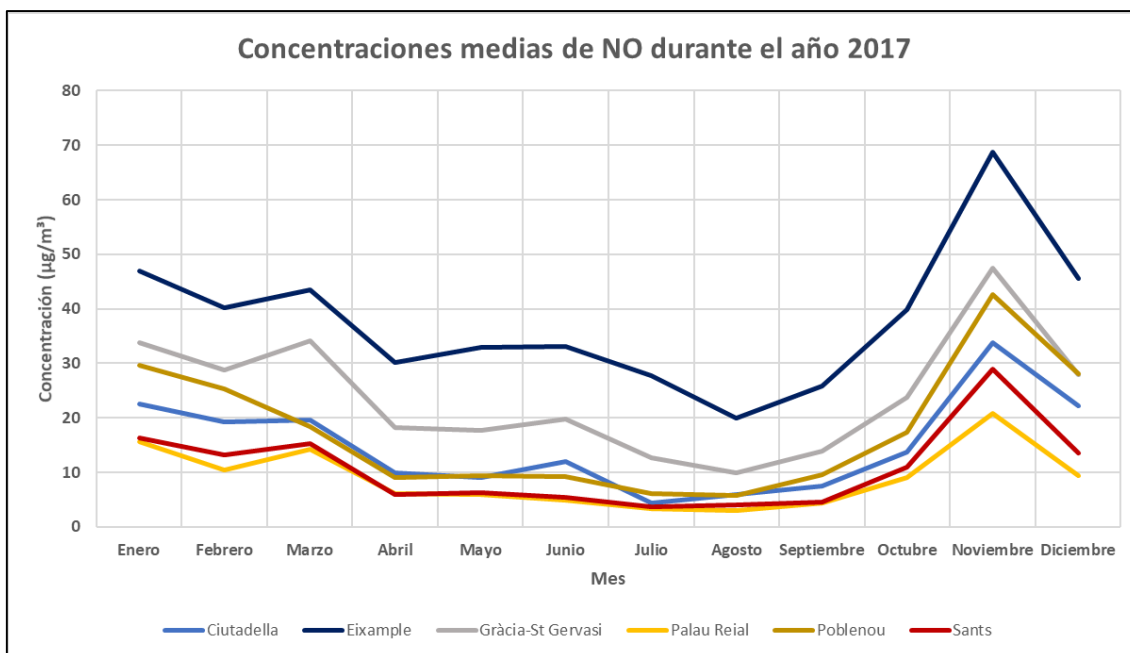


Figura 12. Evolución de los valores medios mensuales del óxido de nitrógeno (NO) en Barcelona durante el año 2017 (Fuente: elaboración propia).

De nuevo, tal y como se ha visto en los casos anteriores, se produce un repunte considerable durante el mes de noviembre, con concentraciones que en el caso del Eixample prácticamente alcanzan los 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media mensual.

Las concentraciones medias más elevadas se vuelven a encontrar en las estaciones más céntricas, disminuyendo hacia las situadas en la periferia.

En el caso del dióxido de azufre (SO_2), solamente cuatro estaciones automáticas lo monitorizan: Eixample, Gràcia-St. Gervasi, Palau Reial y Vall d'Hebron (figura 13).

De manera general, los promedios mensuales de las estaciones varían entre 1 a 3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante el año se producen diversas oscilaciones, observándose durante el mes de junio un repunte, en al menos tres de las cuatro estaciones. Durante los tres meses siguientes la concentración disminuye, registrándose de nuevo un aumento en la concentración de Gràcia-St. Gervasi a partir de septiembre u otro aumento a partir de octubre en el caso de la estación de Eixample.

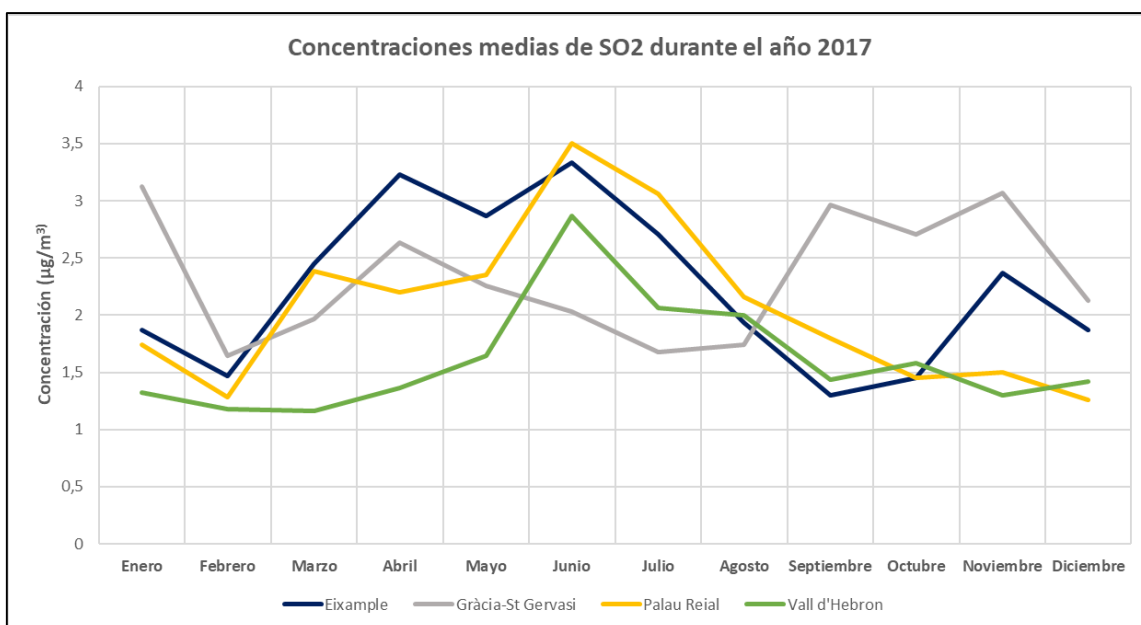


Figura 13. Evolución de los valores medios mensuales del dióxido de azufre (SO₂) en Barcelona durante el año 2017 (Fuente: elaboración propia).

El ozono es medido a partir de cinco de las siete estaciones disponibles en la ciudad. En este caso, encontramos registros para las estaciones de Ciutadella, Eixample, Gràcia-St. Gervasi, Palau Reial y Vall d'Hebron (figura 14).

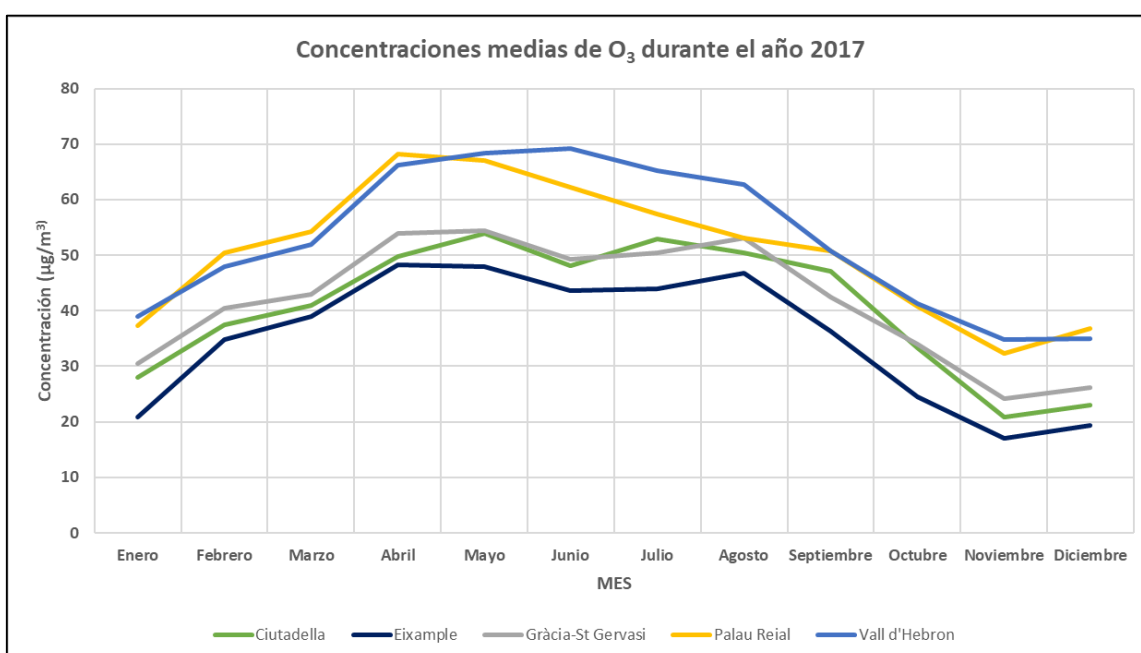


Figura 14. Evolución de los valores medios mensuales del ozono (O₃) en Barcelona durante el año 2017 (Fuente: elaboración propia).

De manera general, todas las estaciones tienen una dinámica parecida. En este caso y a diferencia de los anteriores, los valores elevados se obtienen en las estaciones menos céntricas, como Vall d'Hebron o Palau Reial.

Tal como se observa en la figura 14, a partir de febrero se produce un aumento considerable de las concentraciones de ozono, dándose los mayores valores en primavera y verano. Como ya se ha comentado con anterioridad, las concentraciones de ozono pueden aumentar en condiciones meteorológicas más favorables (estabilidad y ausencia de viento), así como en períodos importantes de insolación, por su carácter fotoquímico. Por lo tanto, las condiciones veraniegas favorecen el aumento de concentración de ozono en comparación con los meses más fríos y con menos insolación.

Durante el año 2017, no se ha superado el umbral de información ni el de alerta. Recordemos que el umbral de información se sitúa en los $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el promedio de una hora y el de alerta en los $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mismo promedio. Ninguna estación alcanzó ninguno de estos valores horarios durante el año.

En cuanto a las partículas (PM10), este contaminante se mide en cinco de las siete estaciones automáticas de la ciudad: Eixample, Gràcia-St. Gervasi, Palau Reial, Poblenou y Vall d'Hebron.

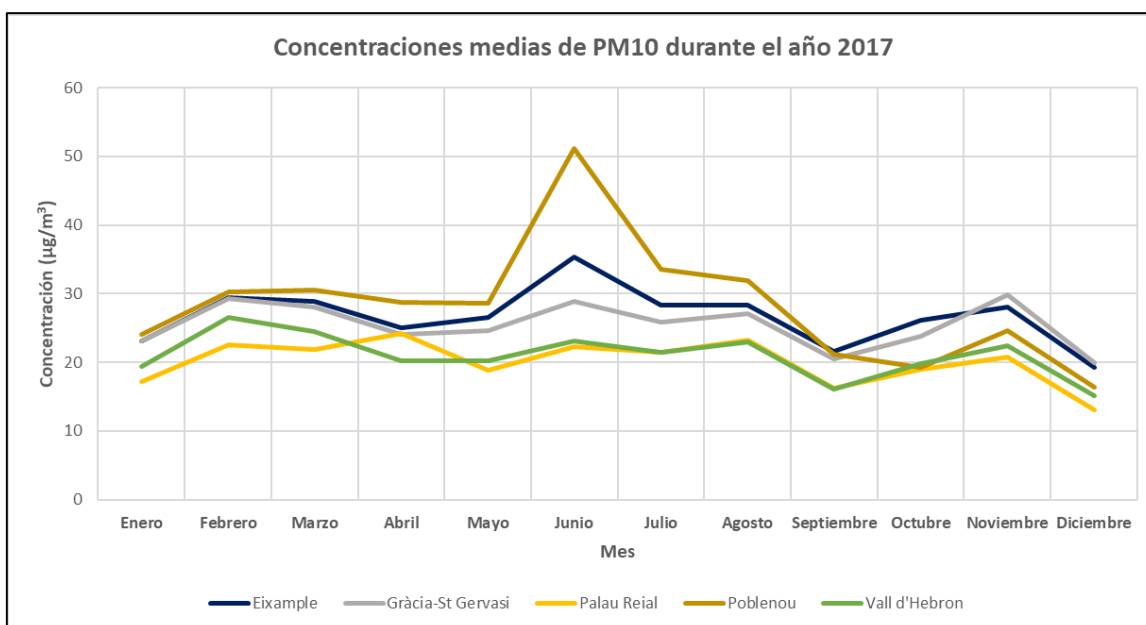


Figura 15. Evolución de los valores medios mensuales de las PM10 en Barcelona durante el año 2017 (Fuente: elaboración propia).

Tal y como se puede ver en el gráfico (figura 15), de manera general y durante todo el periodo, la cantidad de PM10 fluctúa entre los 10 a poco más de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo de nuevo las estaciones más céntricas las que dan un promedio mayor, en contraste con las de la periferia (Vall d'Hebron o Palau Reial), que están por debajo del resto durante gran parte del periodo.

A simple vista destaca un gran repunte durante el mes de junio, principalmente en las estaciones de Poblenou y Eixample. Este aumento en concreto del mes de junio es debido a un repunte importante en la concentración de PM10, tal y como se explicará y analizará más adelante. Durante el resto del año, los valores medios siguen dinámicas parecidas, con algunas fluctuaciones poco destacables.

3.4. Caracterización sinóptica

A continuación, se realizará la caracterización de las situaciones sinópticas diarias registradas durante el año 2017, así como el análisis de algún período concreto o episodio donde la contaminación se ha visto incrementada, con tal de conocer la relación entre las condiciones atmosféricas y la contaminación.

Para ello se han determinado las situaciones sinópticas diarias, a partir de la observación de los mapas sinópticos, tanto en superficie como en altitud (500 hPa). Concretamente, se han empleado los mapas de Wetterzentrale.

3.4.1. Frecuencia anual, mensual y estacional de las situaciones sinópticas

La determinación de cada tipo de situación sinóptica se ha realizado basándose en la clasificación propuesta por Martín Vide (2005) para la península Ibérica y Baleares.

Durante el año 2017 se ha podido constatar hasta un total de 12 situaciones sinópticas distintas, que al menos han ocurrido durante un día en la ciudad de Barcelona y en su área circundante.

Las situaciones sinópticas encontradas han sido: Advección del este, Advección del nordeste, Advección del noroeste, Advección del norte, Advección del oeste, Advección del sudoeste, Advección de sur, Anticiclón, Anticiclón térmico, Baja, Baja térmica y Pantano barométrico.

Cabe destacar que en algunas fechas ha resultado complicada la determinación de la situación debido a la poca claridad sinóptica, así que se ha optado por asignar la situación más aproximada a partir de la experiencia personal, así como teniendo en cuenta la situación de los días previos y días posteriores, ya que algunos días actuaban como períodos de transición entre dos situaciones bien diferenciadas.

Una vez determinadas las situaciones sinópticas diarias, se ha procedido a calcular la frecuencia de dichas situaciones a lo largo del año, estableciendo el número de días en que se han producido y el porcentaje que suponen con respecto al total.

Situación sinóptica	Nº de días al año	% del total
Anticiclón	138	37,9%
Advección del este	10	2,7%
Advección del noroeste	42	11,5%
Advección del nordeste	29	7,9%
Advección del norte	13	3,6%
Advección del oeste	22	6%
Advección del sudoeste	13	3,6%
Advección de sur	9	2,5%
Anticiclón térmico	3	0,8%
Baja	47	12,9%
Baja térmica	6	1,6%
Pantano barométrico	33	9%

Tabla 10. Frecuencia anual de las situaciones sinópticas determinadas (Fuente: elaboración propia).

Tal y como se refleja en la tabla 10, la situación meteorológica predominante ha sido el Anticiclón con un total de 138 días al año, lo que representa el 37,9% del total, por lo tanto, resulta que una de las situaciones de altas presiones, caracterizada por su gran estabilidad atmosférica, es la mayoritaria.

La siguiente situación sinóptica más representativa ha sido la Baja, con un 12,9%, situación, en cambio, característica de tiempo inestable. Las advecciones del noroeste, bastante típicas de situaciones de frente frío e incluso inestables, le siguen en frecuencia con un 11,5%.

También es importante mencionar el peso de las situaciones de pantano barométrico, con un 9%. Estas situaciones, más propias de verano, como se verá a continuación, son situaciones de transición, con poca definición y gradiente isobárico escaso.

Por el contrario, la situación menos representativa ha sido la de anticiclón térmico, que solo ha estado presente en tres días a lo largo del año.

También se ha calculado la frecuencia de las situaciones sinópticas por meses, obteniéndose los porcentajes que se recogen en la tabla 11.

Mes Sit.	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Anticiclón	22,6%	17,9%	29%	50%	55%	36,7%	29%	38,7%	43,3%	51,6%	36,7%	41,9%
Ad. del este	16,1%	7,1%	6,5%	-	3,2%	-	-	-	-	-	-	-
Ad. noroeste	12,9%	17,9%	9,7%	3,3%	3,2%	23,3%	6,5%	12,9%	23,3%	6,5%	10%	19,4%
Ad. del nordeste	29%	17,9%	3,2%	6,7%	-	-	6,5%	6,5%	-	16,1%	6,7%	3,2%
Ad. del norte	6,5%	3,6%	-	-	3,2%	-	9,7%	-	-	6,5%	3,3%	3,2%
Ad. del oeste	-	3,6%	12,9%	6,7%	3,2%	-	9,7%	3,2%	-	-	-	16,1%
Ad. del sudoeste	6,5%	-	-	3,3%	6,5%	3,3%	-	3,2%	3,3%	-	6,7%	9,7%
Ad. de sur	-	7%	-	6,7%	-	-	3,2%	-	-	6,5%	6,6%	-
Anticiclón T.	3,2%	3,6%	3,2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Baja	3,2%	7,1%	22,6%	10%	9,7%	6,7%	16,1%	16,1%	20,1%	9,7%	23,3%	9,7%
Baja T.	-	3,6%	12,9%	6,7%	12,8%	3,3%	-	-	-	-	-	-
Pantano B.	-	10,7%	-	10%	3,2%	26,7%	19,3%	19,4%	10%	3,1%	6,7%	-

Tabla 11. Frecuencia mensual de las situaciones sinópticas determinadas (Fuente: elaboración propia).

Como se puede observar (tabla 11), las situaciones que se dan durante todos los meses del año son las de anticiclón, la baja y las advecciones del noroeste. La primera es la situación predominante durante todos los meses, exceptuando el mes de enero, en el que las advecciones del nordeste fueron las más frecuentes.

A grandes rasgos se observa una mayor frecuencia de algunas situaciones en los primeros meses del año, u otras en los meses estivales. Por este motivo, también se realiza a continuación, el cálculo de la frecuencia estacional, entendiendo las estaciones del año según el año meteorológico (tabla 12). Con esta distribución estacional se puede ver qué situaciones son más o menos comunes según la época del año.

Durante la primavera (marzo, abril y mayo), la situación predominante es la del anticiclón, aunque hay una gran variabilidad de situaciones, ya que en mayor o menor

medida todas se encuentran representadas. La baja, junto a la baja térmica, las advecciones del noroeste y del oeste son las más representativas durante la primavera.

Est. Sit.	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Anticiclón	44,6%	34,8%	44%	27,8%
Ad. del este	3,3%	-	-	7,8%
Ad. noroeste	5,4%	14,1%	13,2%	16,7%
Ad. del nordeste	2,2%	4,3%	7,7%	16,7%
Ad. del norte	1,1%	3,3%	3,3%	4,4%
Ad. del oeste	7,6%	4,3%	-	6,7%
Ad. del sudoeste	3,3%	2,2%	3,3%	4,4%
Ad. de sur	2,2%	1,1%	4,4%	2,2%
Anticiclón T.	1,1%	-	-	2,2%
Baja	14,1%	13%	18%	6,7%
Baja T.	10,9%	1,1%	-	1,1%
Pantano B.	4,2%	21,8%	6,1%	3,3%

Tabla 12. Frecuencia estacional de las situaciones sinópticas determinadas (Fuente: elaboración propia).

En el verano (junio, julio y agosto), la situación predominante vuelve a ser el anticiclón. No obstante, las situaciones de pantano barométrico en esta estación son mucho más elevadas (21,8%), por lo tanto, se producen estas situaciones poco dinámicas, de estabilidad atmosférica y sin gran movimiento meteorológico. De hecho, si juntamos ambas situaciones de estabilidad resulta que suman el 56,6% del total, como las típicas situaciones de verano. También tiene cierta representatividad, pero lejos de las anteriores las advecciones del noroeste (14,1%) o la baja (13%).

El otoño (septiembre, octubre y noviembre) nos indica una presencia importante de las situaciones con anticiclón, con una representatividad del 44% sobre el total. No obstante, ganan importancia las bajas, con un 18%; así como las advecciones del nordeste (7,7%), que junto a las del noroeste (13,2%) pueden provocar más movimiento meteorológico.

Por último, en invierno (diciembre, enero y febrero) vuelve a tener la representatividad máxima la situación sinóptica correspondiente al anticiclón. Pero, durante esta época invernal ganan protagonismo las advecciones del noroeste (16,7%), nordeste (16,7%), norte (4,4%), e, incluso, las de este (7,8%). Algunas de ellas, como las del norte o las del nordeste pueden desencadenar episodios de frío, con temperaturas por debajo de la media climática y, por lo tanto, propias de la época. Cabe destacar que, si bien en el verano el pantano barométrico supone una relevante representación, en invierno ha sido, tal como era presumible, cuando menos se ha dado, con tan solo un 3,3%.

3.4.2. Caso de estudio 1: El episodio del mes de noviembre

Para la realización de este apartado se ha seleccionado un episodio de contaminación como caso de estudio concreto, donde la concentración de contaminantes aumentaba considerablemente respecto al resto del año o respecto a días anteriores o posteriores. El episodio de contaminación escogido ha sido el correspondiente al mes de noviembre, entre los días 17 al 24, en el que se produjo un notable incremento de la contaminación, en relación con la registrada en días previos o en otros meses, de prácticamente todos los contaminantes. En las figuras 16 a 20 se presenta en forma de gráficos la evolución de la concentración para cada contaminante durante el mes de noviembre, con tal de ver con precisión este aumento.

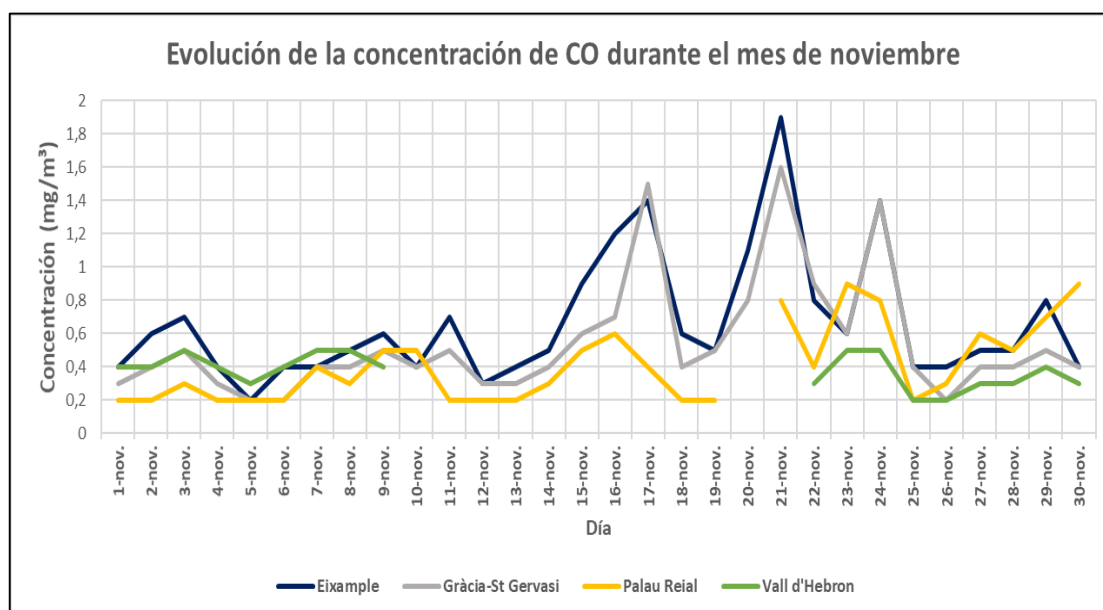


Figura 16. Evolución mensual del monóxido de carbono (CO) en Barcelona durante el mes de noviembre (Fuente: elaboración propia).

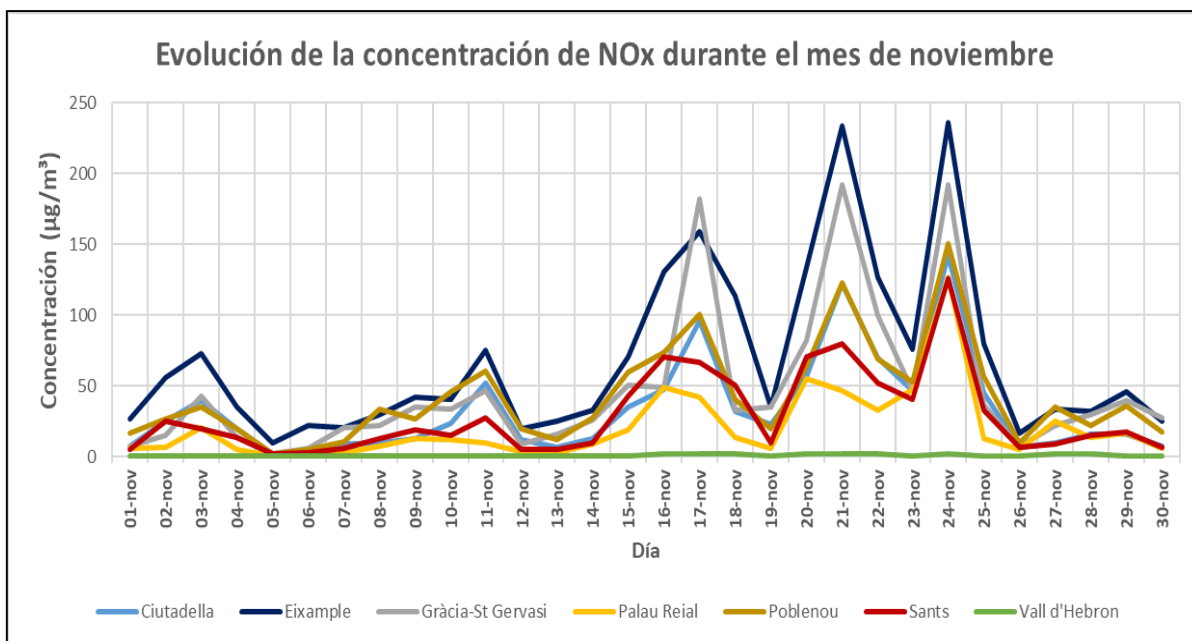


Figura 17. Evolución mensual del óxido de nitrógeno (NO) en Barcelona durante el mes de noviembre (Fuente: elaboración propia).

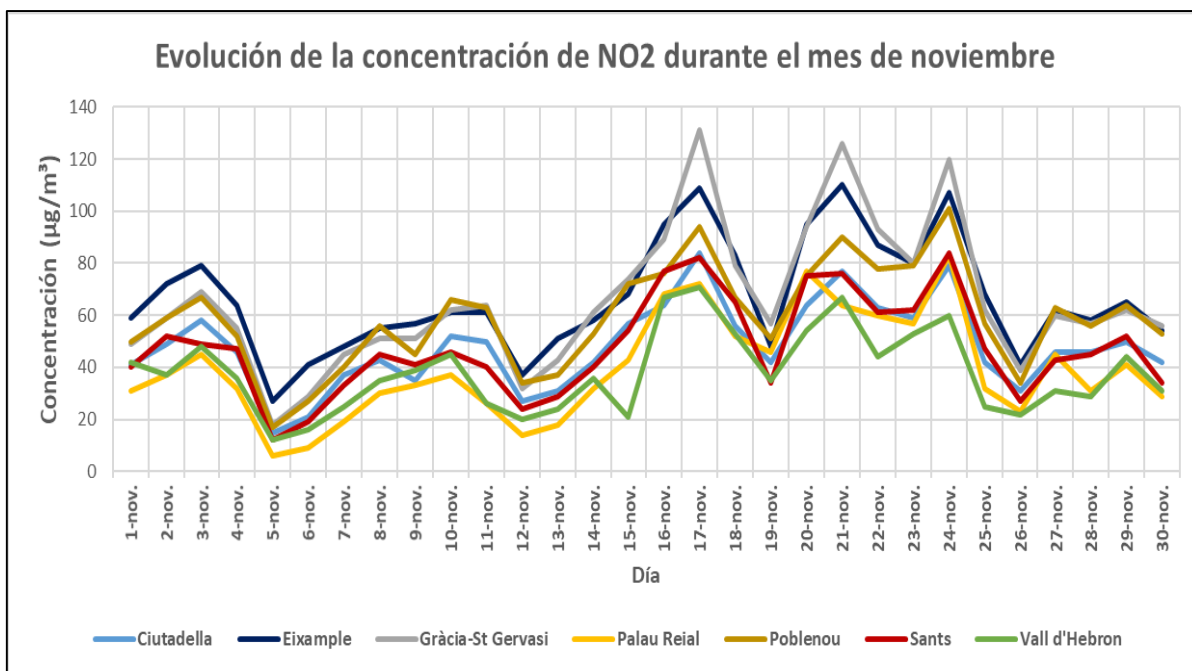


Figura 18. Evolución mensual del dióxido de nitrógeno (NO₂) en Barcelona durante el mes de noviembre (Fuente: elaboración propia).

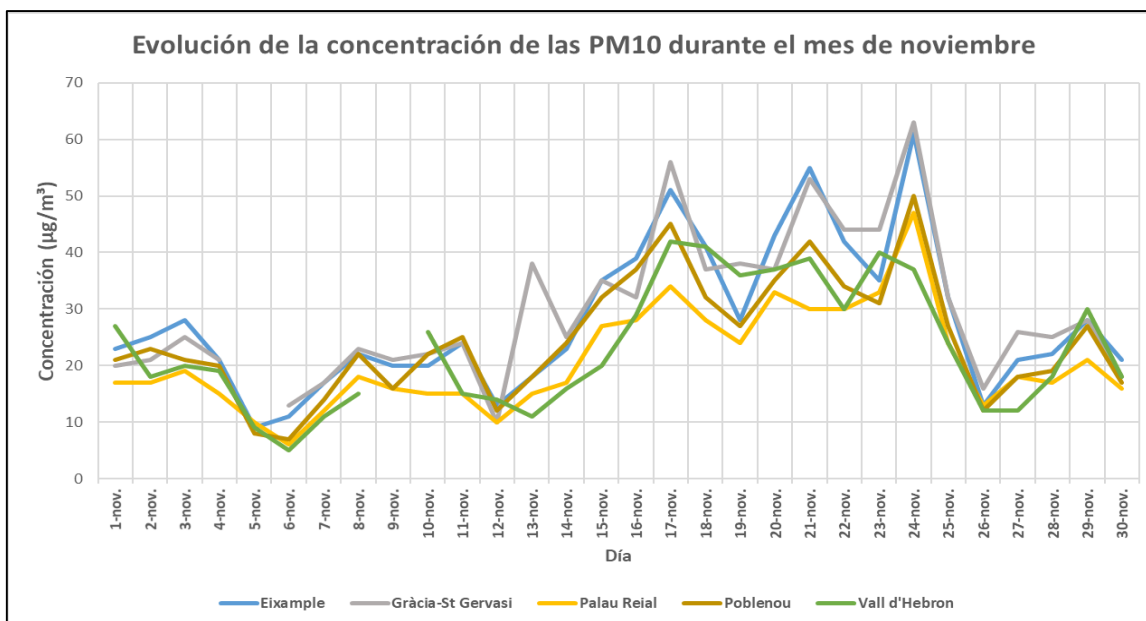


Figura 19. Evolución mensual de las PM10 en Barcelona durante el mes de noviembre (Fuente: elaboración propia).

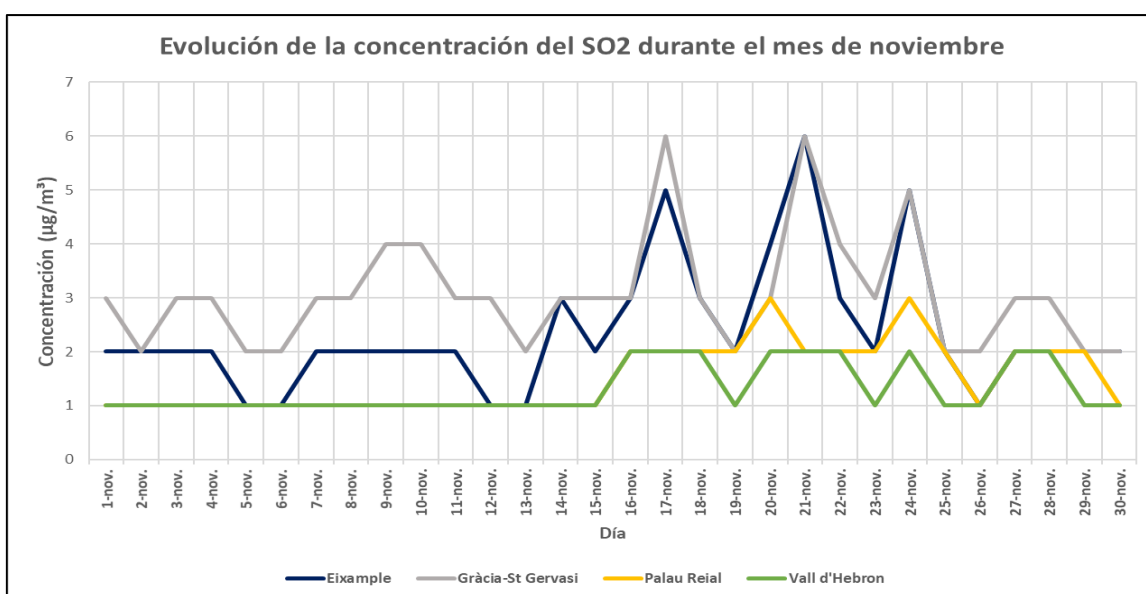


Figura 20. Evolución mensual del dióxido de azufre (SO₂) en Barcelona durante el mes de noviembre (Fuente: elaboración propia).

Como se puede comprobar en los gráficos anteriores, todos los contaminantes presentan, en mayor o menor medida, un aumento de su concentración durante el período del 17 al 24 de noviembre. Durante estos días, todos los contaminantes experimentan un aumento exceptuando el ozono (O₃), que sigue un patrón diferente y numéricamente no se produce

un repunte, por lo que por este motivo no se ha incluido el gráfico correspondiente a su evolución.

Esta situación da comienzo el día 17 de noviembre cuando todos los contaminantes ya mencionados experimentan un aumento considerable en sus concentraciones. De hecho, contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO₂) o los óxidos de nitrógeno (NO_x) alcanzan valores bastante elevados, pues se pasa de valores inferiores a los 40 µg/m³ en días previos a valores superiores a los 100 µg/m³, en el caso del NO₂, o de valores por debajo de 50 µg/m³ a puntas por encima de los 150 µg/m³, en el caso del NO_x. Los valores máximos se registran en las estaciones más céntricas y con más tráfico, como Eixample o Gràcia–St. Gervasi.

Posteriormente, durante los días 18 y 19 de noviembre, se experimenta una disminución importante de todos los contaminantes, para dar paso nuevamente a un incremento que alcanzará los valores máximos entre el período 20 al 24 de noviembre, a excepción de los días 22 y 23, donde las concentraciones vuelven a disminuir.

Debido a las subidas y bajadas de las concentraciones, se analizará a continuación el episodio, teniendo en cuenta los valores de concentración diarios, así como la situación sinóptica de cada día.

Contaminante Estación	CO (mg/m³)	NO_x (µg/m³)	NO₂ (µg/m³)	SO₂ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
Ciudadella	-	96	84	-	-
Eixample	1,4	159	109	5	51
Gràcia – St Gervasi	1,5	182	131	6	56
Sants	-	101	82	-	-
Palau Reial	0,4	42	72	2	34
Poblenou	-	101	94	-	45
Vall d’Hebron	-	2	71	2	42

Tabla 13. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 17 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

Como se puede observar en la tabla 13, los valores de óxido de nitrógeno (NO_x) y dióxido de nitrógeno (NO₂) del día 17 de noviembre son bastante elevados, superiores

a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o próximos, especialmente en las estaciones más céntricas. El día previo, ningún valor alcanzó los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media.

El umbral para considerarse episodio de NO_2 es de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los valores horarios y para considerarse aviso preventivo de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ese día, no se llegó a superar el valor para considerarse episodio, pero sí el preventivo, con $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 19h en la estación de Eixample o con $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la misma hora en la estación de Gràcia–St. Gervasi.

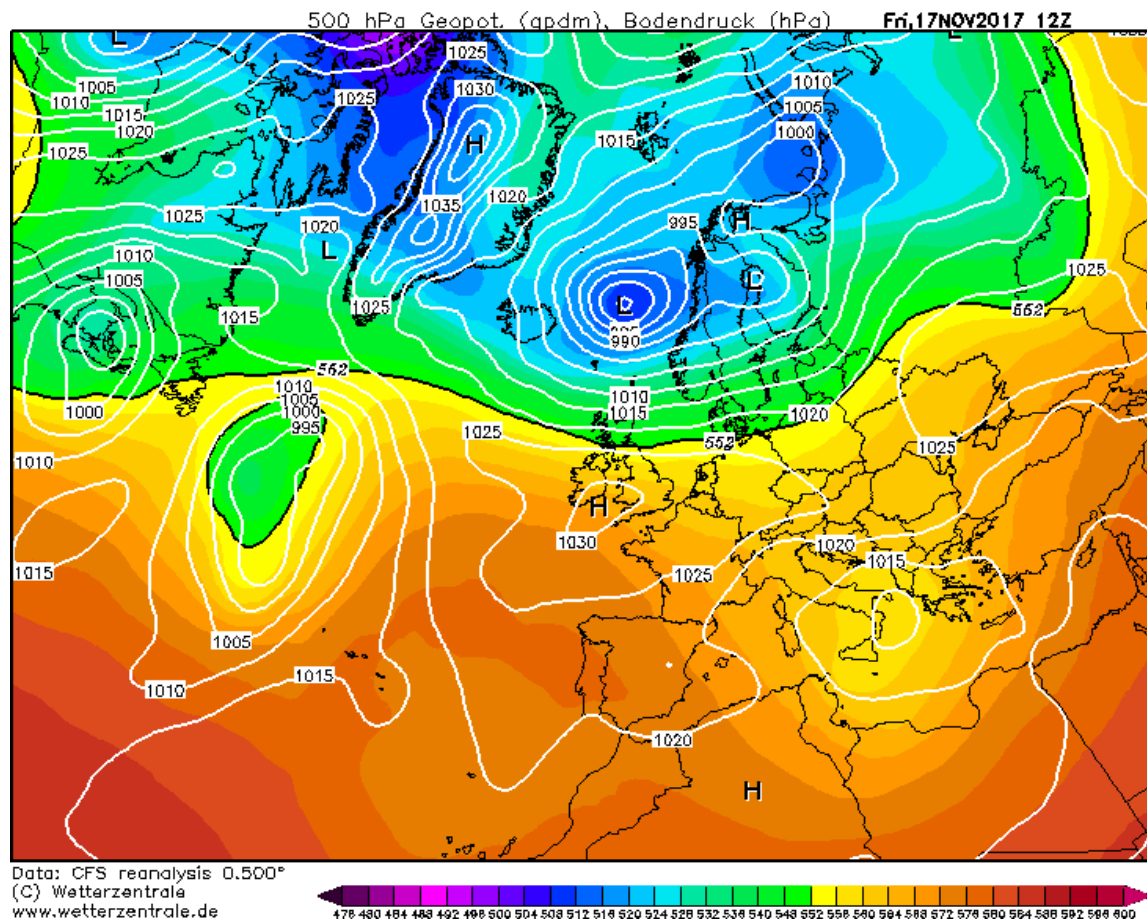


Figura 21. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 17 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

En la figura 21 se muestra el mapa sinóptico para el día 17 noviembre, donde se observa que predominaban las altas presiones tanto en superficie como en altura, con valores entre 1020 y 1024hPa en superficie en el área de estudio. Durante los días anteriores, también hubo altas presiones, con, prácticamente, una nula variabilidad.

Durante esa jornada, en la ciudad de Barcelona se registraron temperaturas máximas superiores a los 20°C , como, por ejemplo, $20,8^{\circ}\text{C}$ en la estación oficial del Servicio Meteorológico de Cataluña situada en el barrio del Raval.

Analizando los datos de temperaturas mínimas, se observa, para el día 17 de noviembre, una situación de inversión térmica. Por ejemplo, las estaciones meteorológicas oficiales de Barcelona–Zoo, Barcelona–Zona Universitaria y Barcelona–Raval registraron unas temperaturas mínimas de 6,3°C, 7°C y 9,7°C, respectivamente. Son temperaturas inferiores a la estación del Observatorio Fabra, situado a 415 msnm, que registró 10,7°C de temperatura mínima. Por lo tanto, las condiciones de gran estabilidad atmosférica y de inversión térmica de subsidencia, impuestas por el dominio de las altas presiones, pudieron ayudar al aumento considerable de las concentraciones de la contaminación en las estaciones de la ciudad.

Contaminante Estación	CO (mg/m³)	NOx (µg/m³)	NO2 (µg/m³)	SO2 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
Ciutadella	-	32	56	-	-
Eixample	0,6	114	83	3	41
Gràcia – St Gervasi	0,4	33	79	3	37
Sants	-	51	65	-	-
Palau Reial	0,2	14	52	2	28
Poblenou	-	41	67	-	32
Vall d’Hebron	-	2	53	2	41

Tabla 14. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 18 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

Como se observa en la tabla 14, las concentraciones el día 18 disminuyen de manera general respecto al día anterior. Las medias de NO solo superan los 100 µg/m³ en una de las estaciones (Eixample), mientras que los valores medios de NO2 no llegan a superar los 100 µg/m³ en ninguna de las estaciones automáticas. No obstante, los valores aún se pueden considerar como moderados. Se superan los 100 µg/m³ en algunas horas puntuales, aunque lejos de los valores registrados durante el día 17 de noviembre.

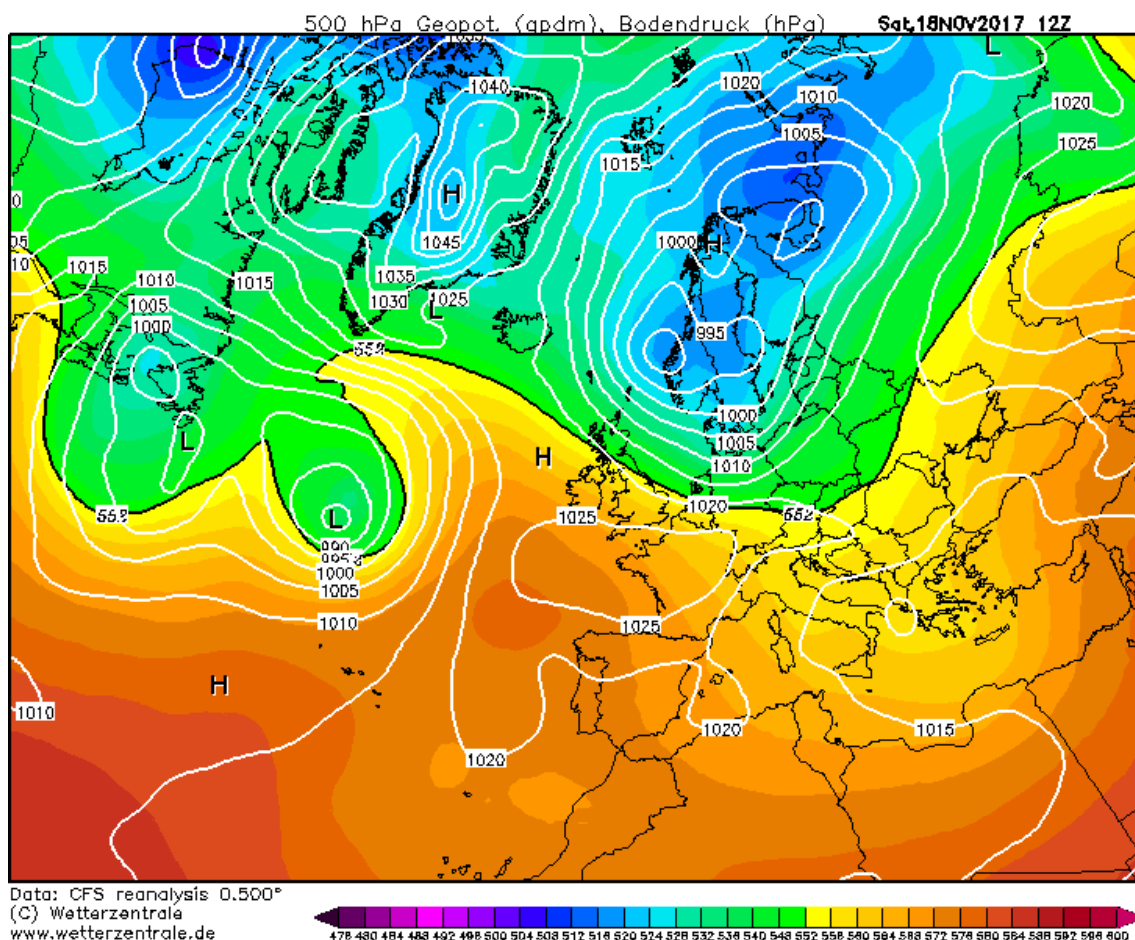


Figura 22. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 18 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Sinópticamente, la situación no es muy diferente a la del día anterior. Aún continua la ciudad bajo dominio de altas presiones. Las temperaturas fueron similares al día anterior con máximas que rondaron los 20°C y rachas de vientos poco destacables. La inversión térmica volvió a estar presente, registrándose temperaturas mínimas superiores en el Observatorio Fabra respecto de las de las estaciones de la ciudad.

Aunque las condiciones meteorológicas no variaron mucho y la inversión térmica también estuvo presente, el fenómeno que podría explicar la disminución (aún con valores elevados) de la contaminación respecto al día anterior, podría ser el hecho de que el día 18 de noviembre era sábado. Por lo general, durante el fin de semana los traslados y trayectos en la ciudad no son tan numerosos como los de los días laborables, por lo que este hecho quizá podría explicar la pequeña disminución de la concentración.

Contaminante Estación	CO (mg/m ³)	NO _x (μg/m ³)	NO ₂ (μg/m ³)	SO ₂ (μg/m ³)	PM ₁₀ (μg/m ³)
Ciudadella	-	23	42	-	-
Eixample	0,5	35	48	2	28
Gràcia – St Gervasi	0,5	35	57	2	38
Sants	-	10	34	-	-
Palau Reial	0,2	6	46	2	24
Poblenou	-	20	51	-	27
Vall d'Hebron	-	1	35	1	36

Tabla 15. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 19 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

Las concentraciones de la contaminación durante el día 19 de noviembre continuaron disminuyendo considerablemente en comparación al 17 de noviembre, hasta el momento, el día de máxima concentración. Los valores fueron mucho más moderados para esta jornada.

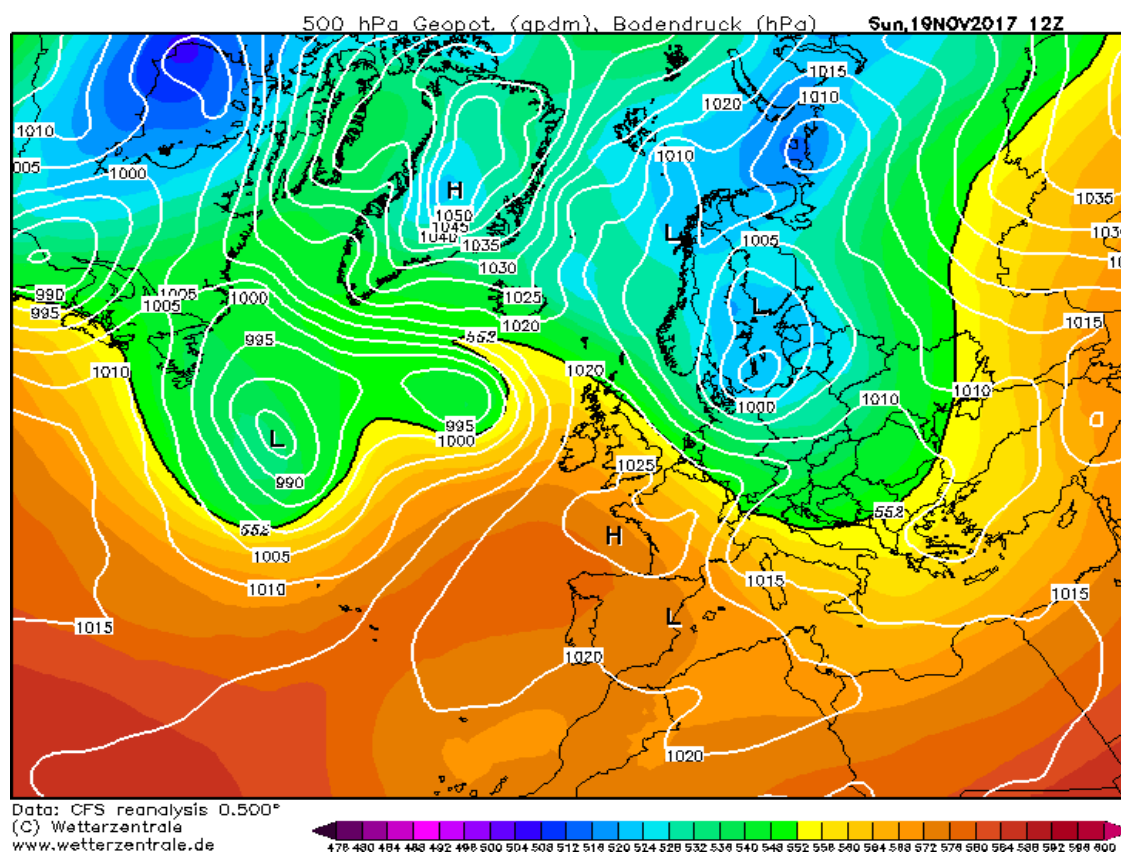


Figura 23. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 19 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

La situación meteorológica, sinópticamente, poco varió. Continuó el anticiclón y, por lo tanto, las altas presiones. No obstante, el viento de nordeste estuvo presente con rachas moderadas, que oscilaron entre los 30 a 50km/h en la ciudad, hecho que pudo contribuir a la dispersión de los contaminantes y la disminución de la concentración. Las temperaturas máximas fueron más bajas y no hubo inversión térmica. Además, la poca movilidad al ser domingo, también pudo ayudar a la disminución de dichas concentraciones.

Contaminante Estación	CO (mg/m³)	NOx (µg/m³)	NO2 (µg/m³)	SO2 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
Ciudadella	-	57	64	-	-
Eixample	1,1	134	95	4	43
Gràcia – St Gervasi	0,8	82	94	3	37
Sants	-	71	75	-	-
Palau Reial	-	55	77	3	33
Poblenou	-	64	75	-	35
Vall d’Hebron	-	2	54	2	37

Tabla 16. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 20 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

El 20 de noviembre las concentraciones volvieron a aumentar de manera general, situándose la media del Eixample para el NO de nuevo por encima de los 100 µg/m³. No obstante, los valores están dentro del umbral.

Sinópticamente, continua la presencia de altas presiones. De nuevo nos encontramos con temperaturas máximas suaves, rondando los 17°C y también, la inversión térmica. En este caso, la estación del Observatorio Fabra, a poco más de 400 msnm registró 10°C de mínima, mientras que la estación de Barcelona–Zoo o Barcelona–Zona Universitaria registraron 7,5°C y 7,2°C, respectivamente.

Además, este nuevo aumento de la concentración, favorecido por la inversión térmica, coincide también con el inicio de la semana y, por lo tanto, con un incremento muy notable de los desplazamientos y de la circulación de vehículos en la ciudad.

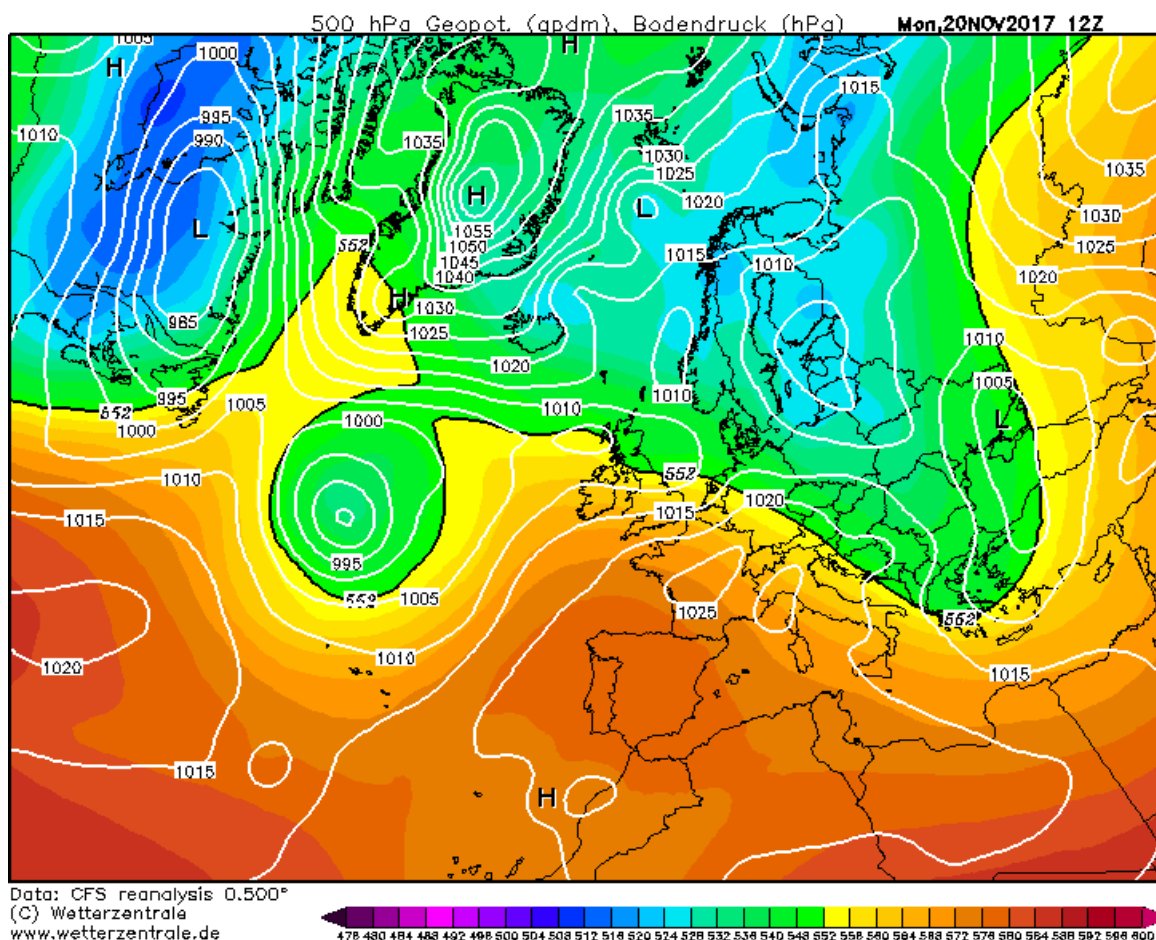


Figura 24. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 20 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Al día siguiente, el 21 de noviembre, las concentraciones vuelven a aumentar considerablemente, en especial el óxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). Se vuelven a superar claramente los 100 µg/m³ en muchas de las estaciones, alcanzándose una concentración media de NO de 234 µg/m³ en la estación de Eixample (tabla 17).

Continúa el anticiclón situándose más hacia el centro y sur peninsular que días atrás, abrazando todo el país y a gran parte de la cuenca del Mediterráneo. Además, hay muy poco gradiente isobárico, por lo que la calma y la estabilidad es prácticamente absoluta (figura 25).

Las temperaturas máximas ascendieron y superaron claramente los 20°C y 21°C, y la inversión térmica de nuevo estuvo presente, apareciendo más marcada. La estación de Barcelona–Zoo registró 6,5°C de mínima, mientras que el Observatorio Fabra registró

12°C. Por lo tanto, las condiciones meteorológicas, de nuevo, favorecieron la persistencia de los contaminantes.

Contaminante Estación	CO (mg/m ³)	NOx (µg/m ³)	NO2 (µg/m ³)	SO2 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
Ciudadella	-	122	77	-	-
Eixample	1,9	234	110	6	55
Gràcia – St Gervasi	1,6	192	126	6	53
Sants	-	80	76	-	-
Palau Reial	0,8	47	64	2	30
Poblenou	-	123	90	-	42
Vall d’Hebron	-	2	67	2	39

Tabla 17. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 21 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

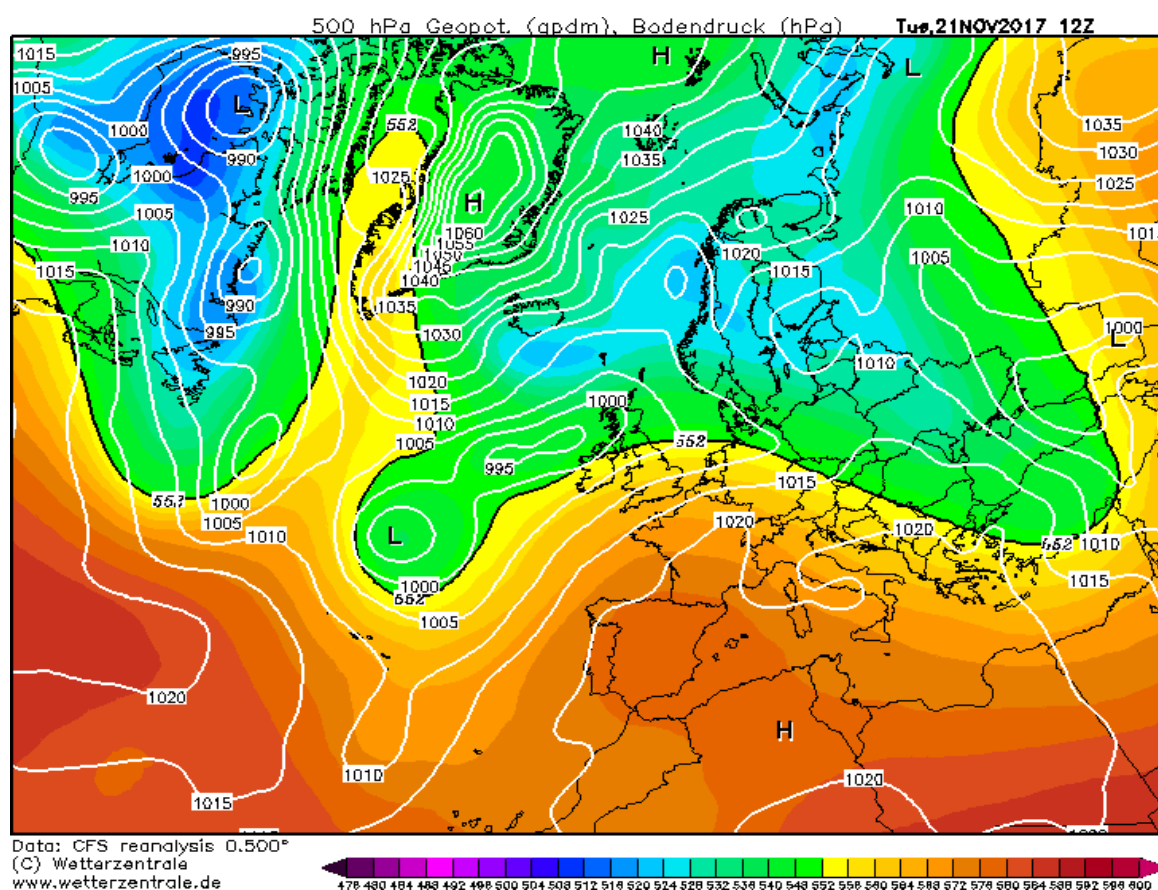


Figura 25. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 21 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Contaminante Estación	CO (mg/m ³)	NOx (µg/m ³)	NO2 (µg/m ³)	SO2 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
Ciudadella	-	70	63	-	-
Eixample	0,8	127	87	3	42
Gràcia – St Gervasi	0,9	100	93	4	44
Sants	-	52	61	-	-
Palau Reial	0,4	33	60	2	30
Poblenou	-	69	78	-	34
Vall d’Hebron	0,3	2	44	2	30

Tabla 18. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 22 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

Las concentraciones para el día 22 de noviembre de 2017 vuelven a ser similares a las del día anterior o más bajas (tabla 18). Se vuelven a registrar, en las estaciones de Eixample y Gràcia–St. Gervasi concentraciones medias superiores a los 100 µg/m³. No obstante, si bien es cierto que el día anterior se alcanzó ese valor de NO en cuatro de las siete estaciones, durante la jornada del 22 de noviembre sólo lo hizo en dos estaciones, y por lo que se refiere al dióxido de nitrógeno (NO₂), en ninguna estación se superó la media de 100 µg/m³.

El anticiclón, empujado por las bajas presiones atlánticas es desplazado hacia el este, aunque perdiendo fuerza en comparación a días anteriores. Se detecta un flujo de vientos de suroeste con bastante gradiente isobárico, principalmente a partir de la segunda mitad de la jornada y que se reforzará durante la siguiente jornada (Figura 26).

Las temperaturas máximas descendieron respecto al día anterior, situándose claramente por debajo de los 20°C en todas las estaciones meteorológicas de la ciudad. No obstante, continuó la inversión térmica, aunque no tan reforzada. Las estaciones de la ciudad registraron temperaturas mínimas por debajo de los 10°C, mientras que el Observatorio Fabra volvió a registrar una mínima superior (11,4°C).

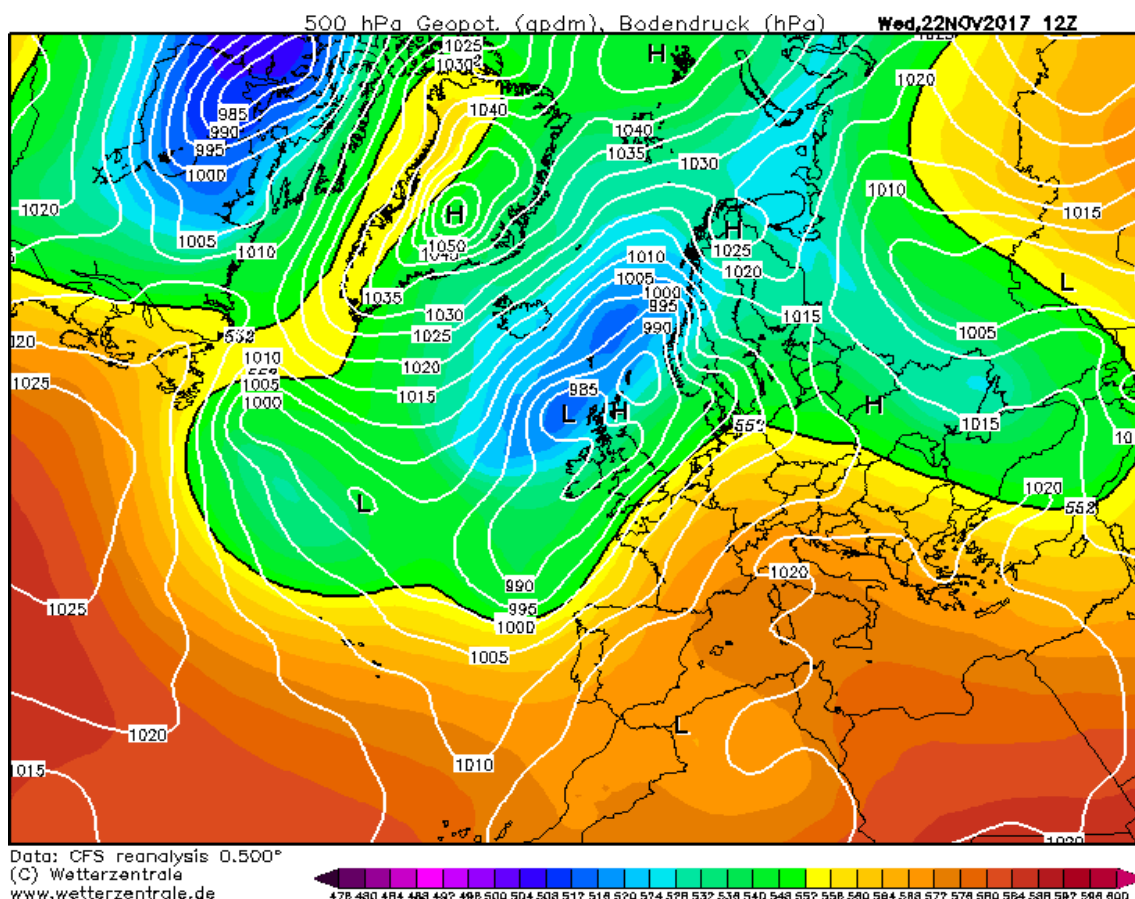


Figura 26. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 22 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Durante la jornada del 23 de noviembre se produjo ya una clara disminución de los contaminantes en todas las estaciones. Tal como puede observarse en la tabla 19 las medias diarias se quedan lejos de los valores de días precedentes. Tanto el óxido de nitrógeno (NO) como el dióxido de nitrógeno (NO₂) no llegan a alcanzar ni los 100 µg/m³.

Se rompe la dinámica de los días anteriores, con una retirada clara del anticiclón y un flujo del sudoeste relativamente marcado (figura 27). Las bajas presiones ganan terreno en la fachada atlántica y el desplazamiento del anticiclón permite la entrada de un frente frío por el oeste peninsular, aunque el frente no afecta prácticamente al área de estudio, que queda todavía lejos de su influencia.

La presencia y aumento de vientos de componente SO, así como la desaparición de la inversión térmica facilitaron en gran medida la dispersión y disminución de los contaminantes.

Contaminante Estación	CO (mg/m ³)	NOx (µg/m ³)	NO2 (µg/m ³)	SO2 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
Ciudadella	-	47	59	-	-
Eixample	0,6	76	80	2	35
Gràcia – St Gervasi	0,6	47	80	3	44
Sants	-	41	62	-	-
Palau Reial	0,9	48	57	2	33
Poblenou	-	53	79	-	31
Vall d'Hebron	0,5	1	53	1	40

Tabla 19. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 23 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

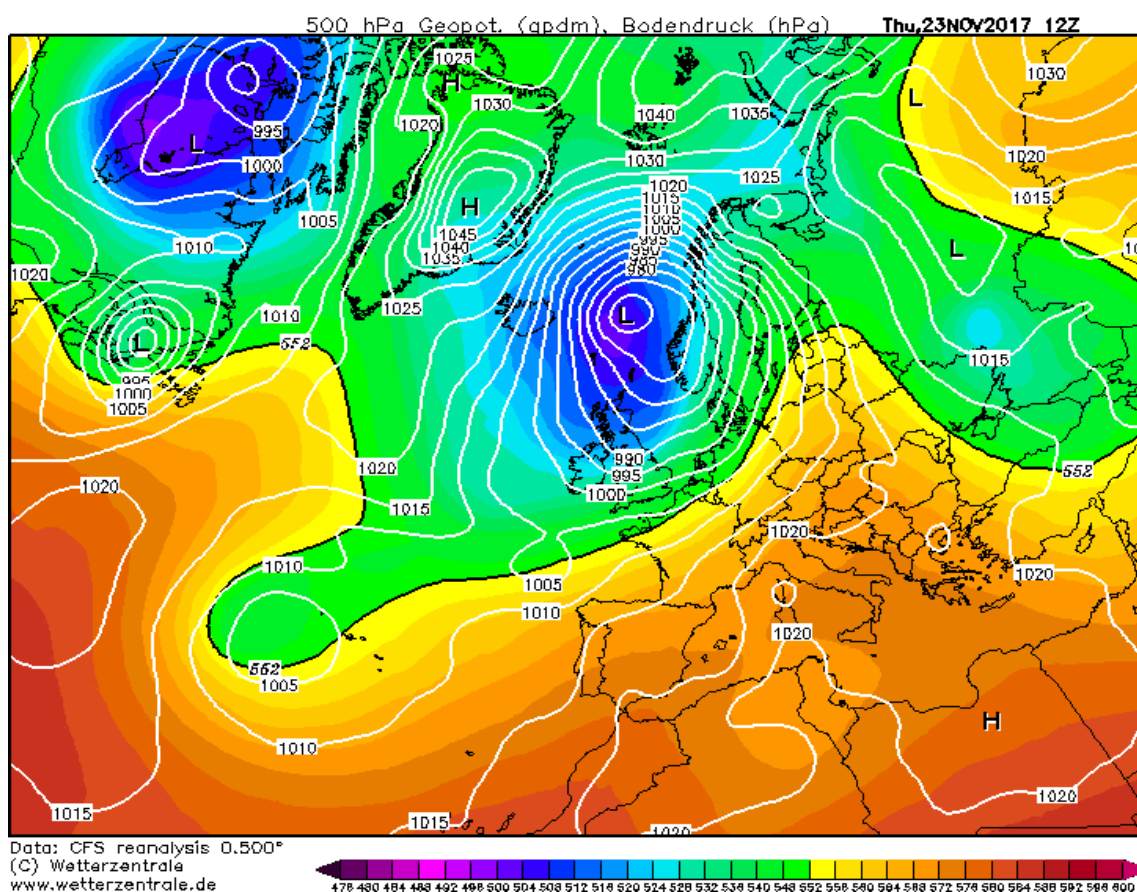


Figura 27. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 23 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Contaminante Estación	CO (mg/m ³)	NOx (µg/m ³)	NO2 (µg/m ³)	SO2 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
Ciutadella	-	142	79	-	-
Eixample	1,4	236	107	5	61
Gràcia – St Gervasi	1,4	192	120	5	63
Sants	-	126	84	-	-
Palau Reial	0,8	127	83	3	47
Poblenou	-	151	101	-	50
Vall d’Hebron	0,5	2	60	2	37

Tabla 20. Concentraciones medias diarias por contaminante para cada estación del 24 de noviembre de 2017 (Fuente: elaboración propia).

Al día siguiente, el 24 de noviembre se produce un aumento significativo e importante de los valores de concentración de todos los contaminantes, destacando en especial el aumento del óxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). Seis de las siete estaciones automáticas registran valores medios superiores a los 100 µg/m³ de NO y tres de las siete, en el caso del NO₂ (tabla 20).

El valor límite horario de 200 µg/m³ para el dióxido de nitrógeno (NO₂) se vio superado claramente en algunas de las estaciones. Por ejemplo, Gràcia–St. Gervasi registró 216 µg/m³ a las 11h o Eixample superó el umbral de aviso preventivo con más de 160 µg/m³.

Como se puede observar en el mapa sinóptico (figura 28), aunque la situación sinóptica continúa siendo muy similar a la del día anterior, el flujo del SO parece ser menos importante durante el día 24. En altura, además, no hay prácticamente movimiento, con muy poco gradiente.

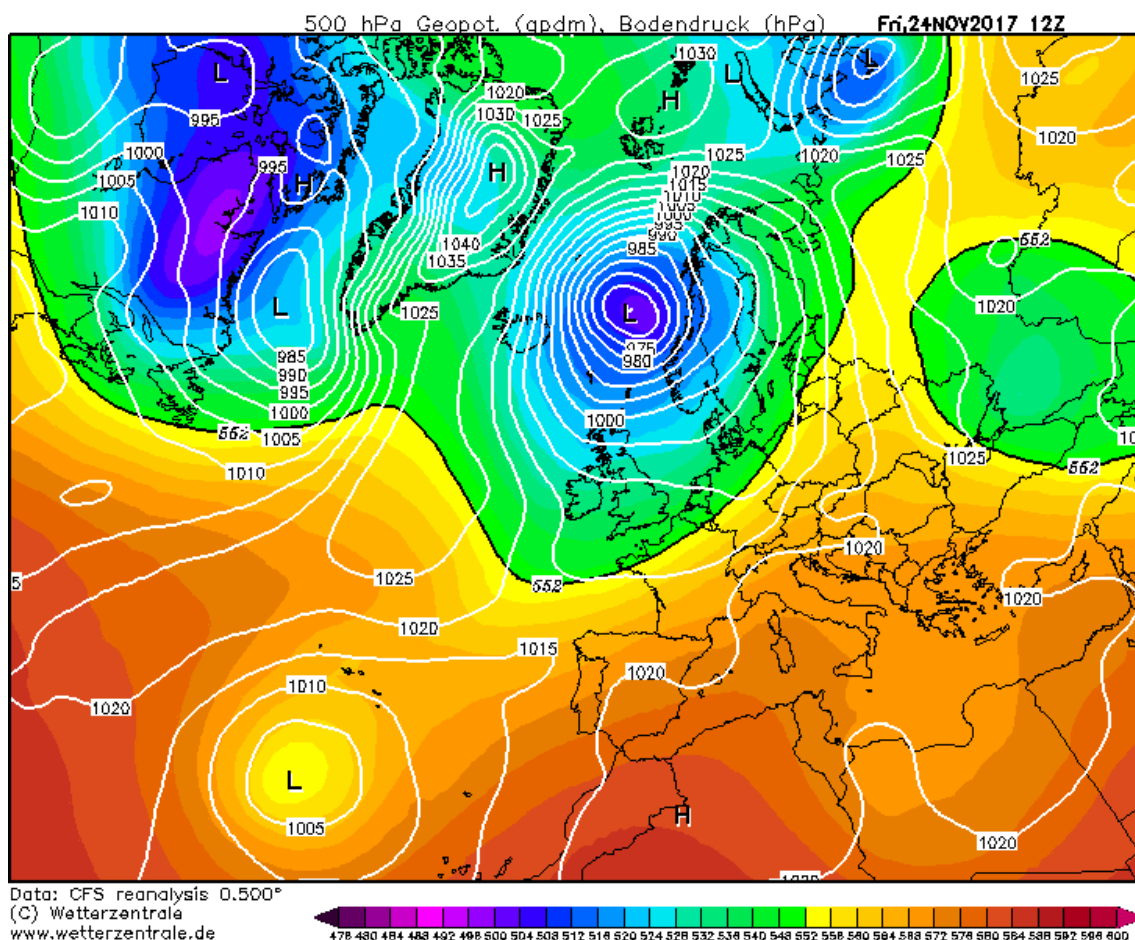


Figura 28. Mapa sinóptico de superficie y de 500 hPa del día 24 de noviembre de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Las temperaturas vuelven a ascender con máximas que superan los 21°C de manera general a lo largo de la ciudad. Además, la inversión térmica vuelve a ser marcada, con mínimas que rondan los 10°C en la ciudad y los 14,7°C en el Observatorio Fabra, por lo tanto, la contaminación vuelve a quedarse estancada debido a este fenómeno y a la poca variabilidad meteorológica.

No obstante, a partir del siguiente día, el 25 de noviembre, esta dinámica se rompe con la llegada de un frente que dejó registros de precipitación rondando los 10 litros por metro cuadrado en la ciudad, lo que facilitó la desaparición de la inversión térmica y la dispersión de los contaminantes.

Las concentraciones de todos los contaminantes disminuyeron durante la jornada siguiente a más de la mitad respecto a las del día 24 de noviembre. Además, durante los días posteriores y gracias a la retirada del anticiclón, los frentes fueron circulando y los valores de contaminación se mantuvieron normales.

3.4.3. Caso de estudio 2: El episodio del 23 de junio

Al efectuar el análisis de los datos de contaminación proporcionados por las estaciones automáticas se observó un repunte considerable de las PM10 en algunas estaciones, concretamente durante el día 23 de junio de 2017. Esa fecha coincide con la noche de San Juan, en la que tradicionalmente se sigue la costumbre popular de la quema de pirotecnia, concentrada, sobre todo, en varias horas. Se ha creído de interés fijar la atención especialmente en este caso, analizando la situación sinóptica durante ese día y el motivo del incremento de dicha contaminación.

En la figura 29 se adjunta el gráfico con las concentraciones medias diarias que alcanzan las PM10 en las diferentes estaciones automáticas durante el mes de junio de 2017.

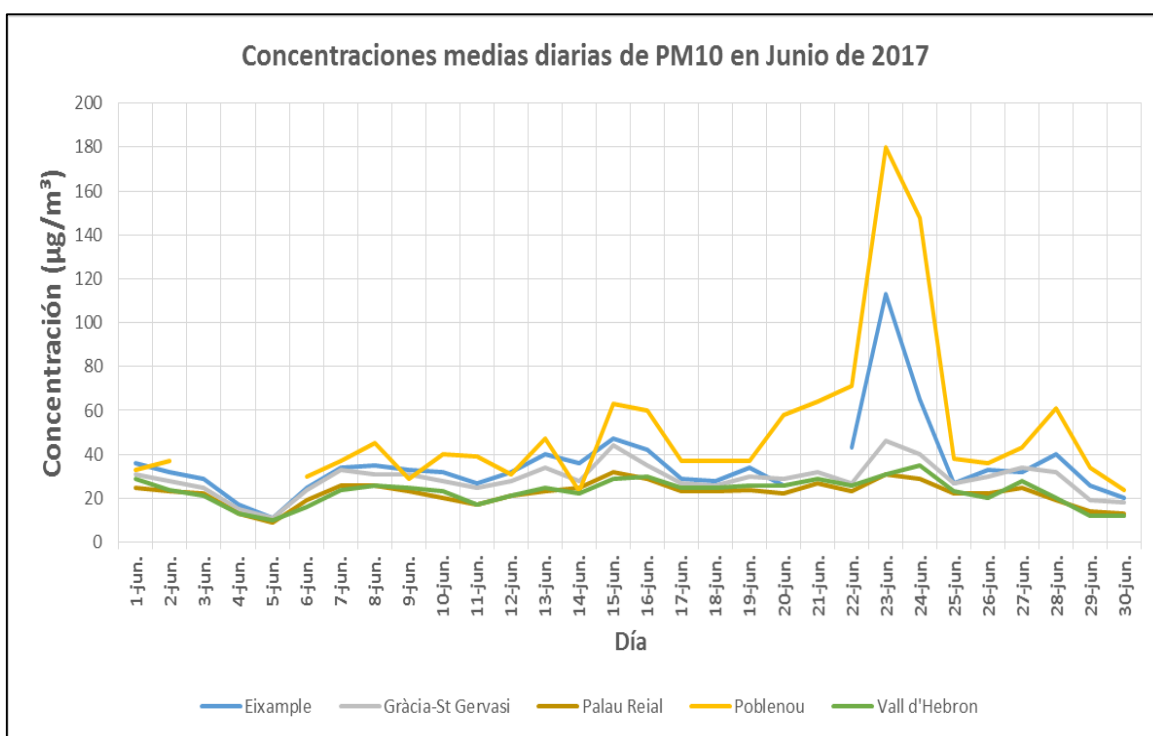


Figura 29. Evolución diaria de las PM10 en Barcelona durante el mes de junio de 2017 (Fuente: elaboración propia).

Tal y como se puede observar a simple vista, el aumento considerable de la concentración de PM10 durante el día 23 de junio es muy evidente, con una subida media diaria hasta los 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de Poblenou, seguida de la del Eixample que supera los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el resto de estaciones no es perceptible, en cambio, ningún aumento significativo de la concentración media ese día.

Se ha trazado también el gráfico con la evolución de las concentraciones medias horarias de PM10 desde el día 23 hasta las nueve de la mañana del día 24 de junio (figura 30).

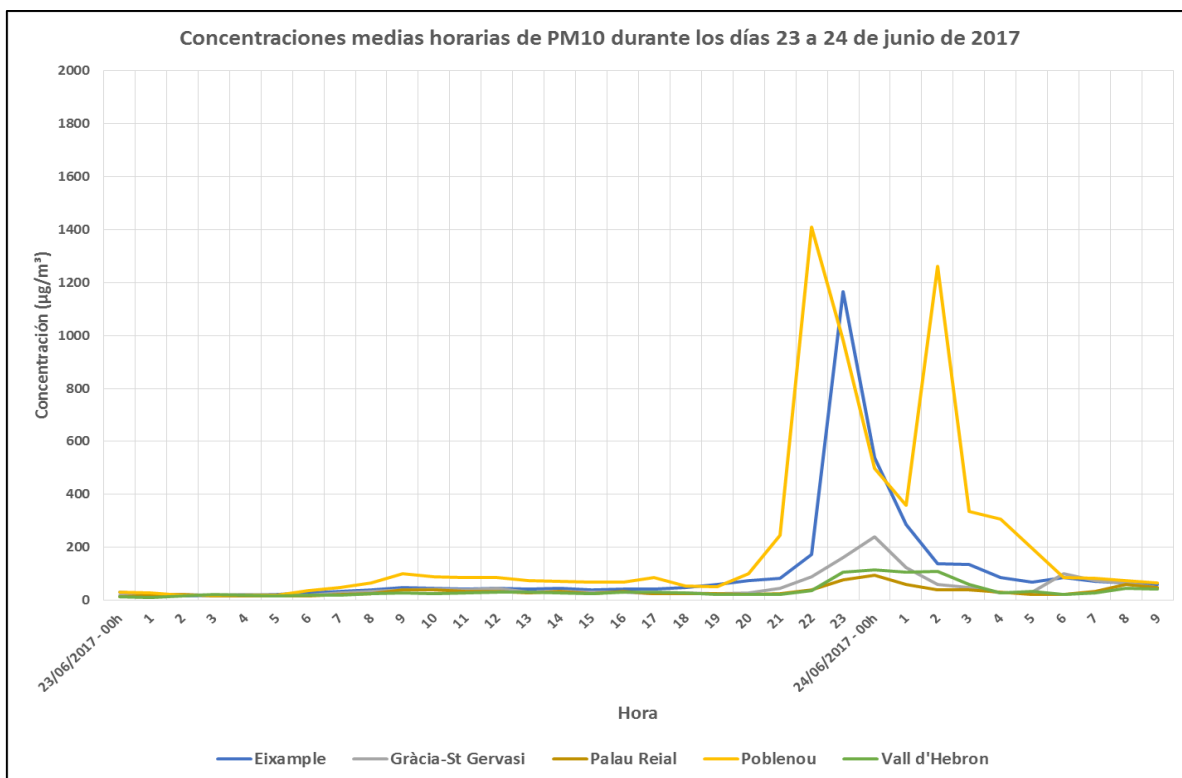


Figura 30. Evolución horaria de las PM10 en Barcelona durante el mes de junio (Fuente: elaboración propia).

El aumento es mucho más evidente en este gráfico, donde se observa con claridad el efecto de la noche de San Juan. A partir de, aproximadamente, las 20h y las 21h, las estaciones del Eixample y Poblenou aumentan su concentración de PM10 de forma considerable, alcanzando el pico máximo, entre las 22h y las 23h, con valores de 1.167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1.409 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Poblenou experimenta otro repunte entre las 2 y las 3 de la madrugada del día 24, volviendo a alcanzar valores superiores a los 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en contraste con el resto de estaciones en que no se observa ningún incremento destacable. Este repunte puede explicarse debido a la situación de la estación del Poblenou, muy cercana a la playa, donde durante los últimos años se ha popularizado la celebración del evento en ese lugar, dándose una gran afluencia de personas y, por lo tanto, un uso de pirotecnia mucho más concentrado en esa zona.

Con el aumento del uso de pirotecnia, las concentraciones de PM10 aumentan considerablemente hasta valores muy elevados. A continuación, se analizan los mapas sinópticos de esos días para conocer qué condiciones meteorológicas eran las predominantes y su posible influencia o contribución en el incremento de las partículas observado.

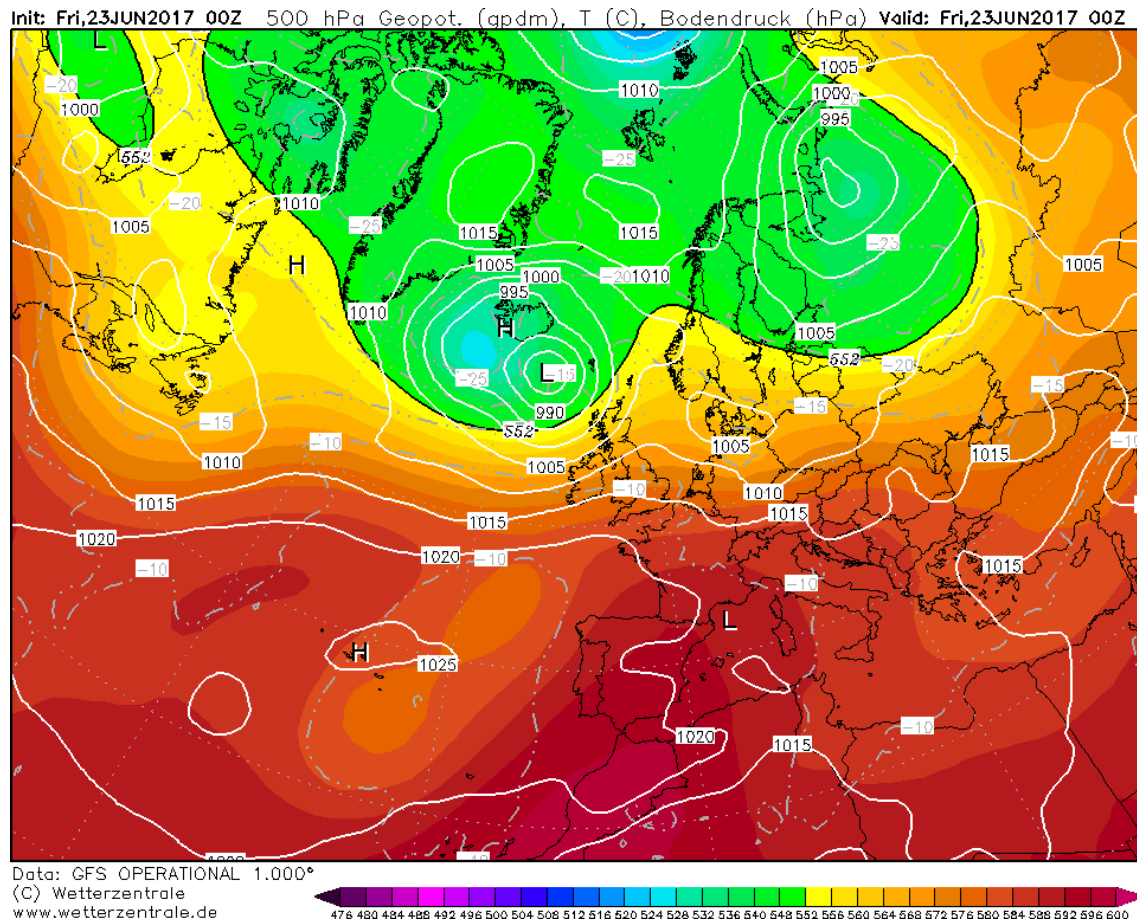


Figura 31. Mapa sinóptico de superficie y de 500hPa del día 23 de junio de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Tal y como puede comprobarse en el mapa (figura 31), la presencia de altas presiones es claramente evidente. Las temperaturas máximas en la ciudad de Barcelona durante el día 23 fueron superiores a los 30°C en todas las estaciones meteorológicas oficiales, igual que el día siguiente que volvieron a ascender por encima de ese valor.

El viento del sur sopló con moderada intensidad durante la jornada. No obstante, perdió intensidad durante las últimas horas del día, manteniéndose en calma durante la noche y madrugada del 24 de junio, facilitando, seguramente, el aumento de la concentración horaria de PM10 (figura 32).

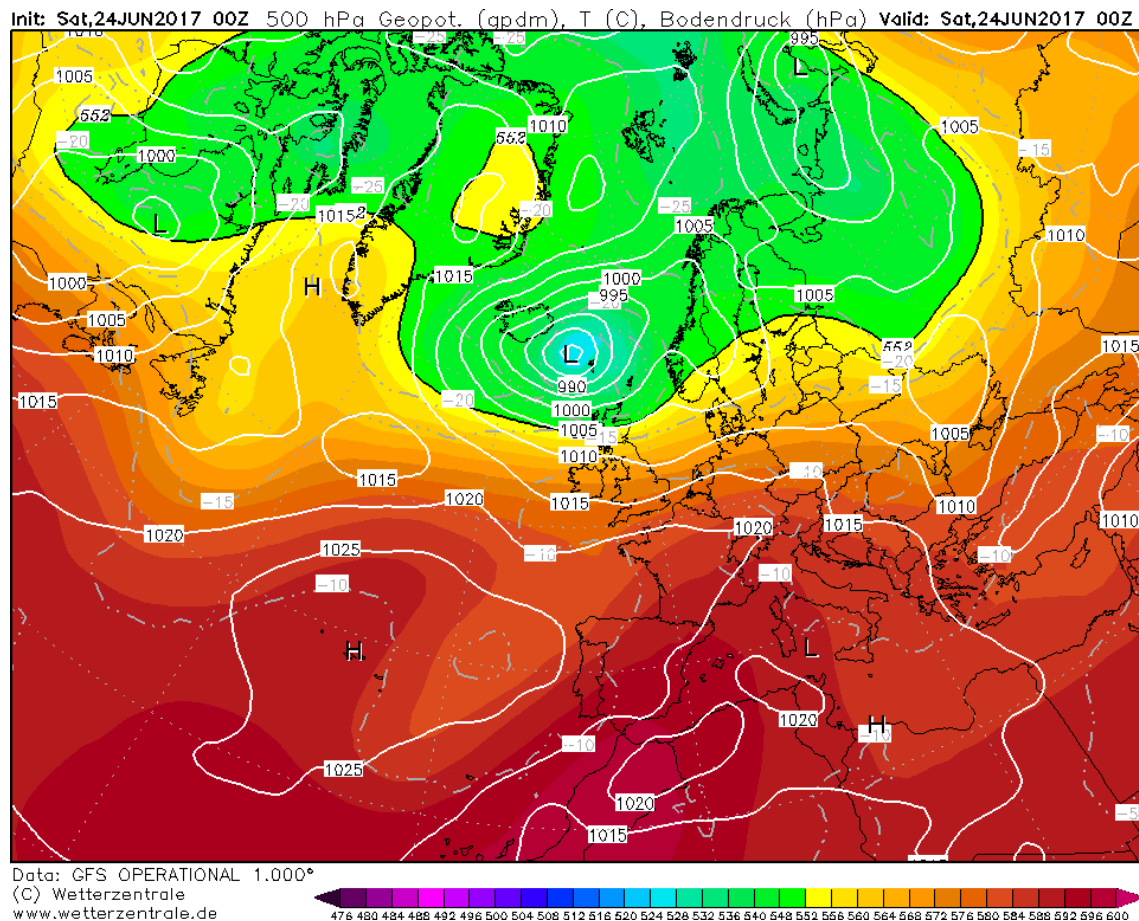


Figura 32. Mapa sinóptico de superficie y de 500hPa del día 24 de junio de 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

Las condiciones atmosféricas favorables, sin precipitación y con viento en calma en esos momentos, favorecieron, sin duda, que pudiera darse ese incremento de las partículas tan llamativo, coincidiendo con la celebración de la verbena de San Juan esa noche.

4. CONCLUSIONES

Tras el análisis, tanto de la concentración de la contaminación durante el año 2017, como del análisis específico de los episodios más representativos y su caracterización sinóptica, se ha podido constatar que, en condiciones meteorológicas favorables, la concentración de la contaminación es mayor.

En el primer caso de estudio analizado, se ha podido comprobar que durante los días de mayor concentración respecto al resto de los días del episodio donde era sensiblemente menor, la situación meteorológica era determinante. Los picos de concentración coinciden con unas condiciones de mayor estabilidad atmosférica, como, por ejemplo, la ausencia de viento y una mayor radiación, que viene sinópticamente dada por una ausencia de gradiente isobárico.

Uno de los fenómenos más determinantes para el aumento de la contaminación es la presencia de inversión térmica. Se ha constatado que, en situación de inversión térmica, la presencia de contaminantes era mayor. En contraste, cuando la inversión térmica no estaba presente, la concentración disminuía, por lo que se confirma plenamente la hipótesis planteada en el Trabajo.

En cambio, las condiciones meteorológicas de inestabilidad provocan una disminución considerable de la concentración de la contaminación atmosférica en la ciudad. De hecho, una mayor presencia de gradiente isobárico, así como la acción de bajas o frentes, facilitan la dispersión de los contaminantes.

Cabe comentar que durante el análisis se ha observado que el comportamiento de la concentración de la contaminación no depende única y exclusivamente de la situación atmosférica. De hecho, tal y como se ha comentado anteriormente, según el día de la semana y el mes del año, la contaminación puede ser mayor o menor. Los días laborables, debido al mayor uso del transporte privado en la ciudad, la contaminación registra un aumento respecto a los días de fin de semana, aunque, hay que advertir que en este Trabajo no se ha realizado ningún análisis pormenorizado de este aspecto. Sí se ha podido comprobar que también existe un comportamiento similar durante los meses del año, siendo los meses estivales los que registran una disminución de la contaminación, probablemente provocada en parte por el período vacacional y el menor número de desplazamientos y actividad en la ciudad. No obstante, el único contaminante que registra un comportamiento diferente es el ozono (O_3), que debido a su carácter fotoquímico tiene

sus valores máximos en los meses estivales, coincidiendo con la mayor intensidad del año de la radiación solar.

El mes de noviembre fue, quizá, el mes con el episodio más importante de concentración de la contaminación, contribuyendo a que los promedios mensuales de algunos de los contaminantes fueran, de manera general, más elevados respecto a los del resto del año. En la estación del Eixample, que fue la que registró las mayores concentraciones, contaminantes como el monóxido de carbono (CO) registró $0,6 \text{ mg/m}^3$ en el mes de noviembre, valor coincidente también con el de marzo. Pero fueron, sobre todo, el dióxido de nitrógeno (NO_2), con $65,6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, y, especialmente, el óxido de nitrógeno (NO), $68,7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, los que muestran un mayor promedio mensual. En el caso del óxido de nitrógeno (NO) la diferencia del mes de noviembre en relación con el resto de los meses es muy notable. El análisis detallado de este episodio como caso de estudio ha permitido comprobar que los valores de dichos contaminantes aumentaron, en gran medida, gracias a las condiciones atmosféricas favorables, ya que las situaciones sinópticas predominantes en esos días estuvieron caracterizadas por una gran estabilidad y la presencia de inversión térmica. En cuanto a la evolución de las partículas PM10 a lo largo del año destaca, en especial, el promedio mensual más elevado que se produce en el mes de junio. La contribución en ese promedio mensual, de la concentración de partículas de unos días determinados, como son los coincidentes con la celebración de la verbena de San Juan, fue determinante. El análisis de este episodio como caso de estudio también permitió constatar igualmente la participación favorable de las condiciones sinópticas en esos días que facilitaron la concentración de partículas, impidiendo su inmediata dispersión.

El análisis de los promedios mensuales registrados en las diversas estaciones automáticas de medición también deja notar diferencias significativas. Prácticamente, en todos los contaminantes, los mayores valores se registran en las estaciones ubicadas en pleno centro urbano o muy próximas, especialmente, en la del Eixample y la de Gràcia-St.Gervasi. Mientras que las estaciones de Palau Reial y Vall d'Hebron, ubicadas en una localización más periférica respecto al centro, siempre son las que dan los menores valores, excepto en el caso del ozono (O_3), que sucede justo lo contrario.

La caracterización sinóptica del año se ha realizado a partir de la determinación de las situaciones sinópticas diarias y el posterior cálculo de frecuencias a nivel anual, mensual y estacional. Los resultados obtenidos señalan claramente que las condiciones

atmosféricas de estabilidad son las predominantes durante el año. De hecho, un total de 138 días (37,9% del total) registraron situación anticiclónica, favoreciendo la mayor concentración de contaminación durante esos días. Además, otra situación sinóptica que favorece dichas concentraciones es el pantano barométrico, que estuvo presente durante 33 días del año (9% del total). Por lo tanto, encontraríamos que estas dos situaciones caracterizadas por la estabilidad llegan a alcanzar un porcentaje muy notable (46,9%), es decir, casi la mitad del año 2017 estuvo caracterizada por situaciones sinópticas de estabilidad atmosférica.

Mensualmente los resultados son similares. El anticiclón es la situación sinóptica más habitual durante todos los meses, con una representatividad que alcanza hasta el 55% en mayo, o el 51,6%, en octubre. El único mes donde el anticiclón no fue la situación mayoritaria fue el mes de enero (22,6%), donde las advecciones del nordeste fueron las principales, con un 29% del total.

El análisis estacional también ha revelado que las situaciones sinópticas de anticiclón se imponen en las cuatro estaciones del año 2017, sin excepción, siendo primavera y otoño cuando más representatividad tienen, con un 44,6% y un 44%, respectivamente.

En definitiva, se concluye, a partir de los resultados obtenidos en el Trabajo, que las condiciones meteorológicas y las situaciones sinópticas caracterizadas como de estabilidad atmosférica, que fueron las predominantes a lo largo del año 2017, tuvieron una clara relación con el incremento observado de la concentración de la contaminación en la ciudad de Barcelona.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, M. et al. (2009). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*. 75p.
- Agencia de Salud Pública de Barcelona. (2016). *Contaminació atmosférica i salut*. 7 p.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). Monóxido de Carbono. En: *Resumen de salud pública*.
- Ajuntament de Barcelona (2017). *Distintius ambientals de la DGT*. Consultada en febrero de 2018, en <https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/ca/episodis#distintius>
- Ajuntament de Barcelona (2018). *Qualitat de l'Aire*. Consultada en febrero de 2018, en <https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/ca>
- Arden, C. y Dockery, W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, p. 709-742.
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), p. 159-175.
- Ballester, F. et al. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), p. 109-121.
- Barnes, R. et al. (1997). *SO2, position paper*. En: European Comission.
- Basagaña, X. et al. (2018). Effect of public transport strikes on air pollution levels in Barcelona (Spain). *Science of The Total Environment*, 610-611, p. 1076-1082.
- Bernatzky, A. (1983). The effects of trees on the urban climate. En: *Trees in the 21ST Century*.
- Bolund, P. y Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, vol. 29.
- Chuang, K. et al. (2006). The Effect of Urban Air Pollution on Inflammation, Oxidative Stress, Coagulation, and Autonomic Dysfunction in Young Adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 176, nº 4.
- Clavero, P. (1990). La estabilidad atmosférica como factor de contaminación del aire: otoño de 1985 en Barcelona. *Revista de Geografía*, vol. XXIV, p. 17-26.
- Cohen, A. J. et al. (2009). *Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y CEAM, 372 p.
- Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya. (2018). *Mètodes de referència utilitzats per determinar la concentració de contaminants*. Consultado en marzo de 2018, en http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/avaluacio/xarxa_de_vigilancia_i_previsio_de_la_contaminacio_atmosferica__xvpca/conceptes_clau/metodes_mostreig_i_mesura.pdf

Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya. (2018). *Qualitat de l'aire*. Consultado en febrero de 2018, en http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/

España. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. (BOE [en línea], núm. 25, 29-01-2011, p. 11-22). <<https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-1645-consolidado.pdf>>

Generalitat de Catalunya. (2018). *Los aparatos de medición*. Consultado en marzo de 2018, en http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/avaluacio/xarxa_de_vigilancia_i_previsio_de_la_contaminacio_atmosferica_xvpca/conceptes_clau/

Goyer, R.A. et al. (1985). Potential human health effects on acid rain: report of a workshop. *Environmental health perspectives*, vol. 60, p. 355-368.

Jáuregui, E. y Luyando, E. (1999). Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *International Journal of Climatology*, 19, p. 683-694.

Khiem, M. et al. (2010). Analysis of relationship between changes of meteorological conditions and the variation of O3 levels in summer over the central Kanto area. *Advances in Meteorology*, vol. 10, article ID 349248.

Levin, Z. y Cotton, W. (2008). *Aerosol Pollution Impact on Precipitation: A Scientific Review*. Springer Science & Business Media.

Martín Vide, J. (2005). *Los mapas del tiempo*. Barcelona: Davinci Continental, 219p.

McPherson, E. et al. (1997). Quantifying urban forest structure, function and value: The Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosystems I*, p. 49-61.

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2018). *Normativa de calidad del aire*. Consultada en marzo de 2018, en <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/default.aspx>

Moreno García, M^a C. (2010). *Climatología urbana*. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona, 71 p.

National Pollutant Inventory, Australian Government. (2018). *Reducing pollution*. Consultada en febrero de 2018, en <http://www.npi.gov.au/reducing-pollution>.

Organización Mundial de la Salud. (2016). *Ambient air pollution. A global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva: World Health Organization, 131 p.

Puigcerver, M. y Carrascal, M. D. (2008). *El medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona, 245 p.

Qian, Y. et al. (2014). Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. *Journal of Geophysical Research*, vol 114, Issue D7.

Rivas, I. et al. (2014). Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain. *Environment International*, 69, p. 200-212.

Rubio, V. (2014). *La gestión ambiental en la pequeña y mediana empresa* [en línea]. Departamento de Industria y Medio Ambiente, Cámara de Comercio, Industria y Navegación de Castellón. Disponible en: <http://www.planificarge.com.ar/documentos/articulos/021.pdf>

Schwela, D. (2000). Air Pollution and Health in Urban Areas. *Reviews on Environmental Health*, 15, p. 13-42.

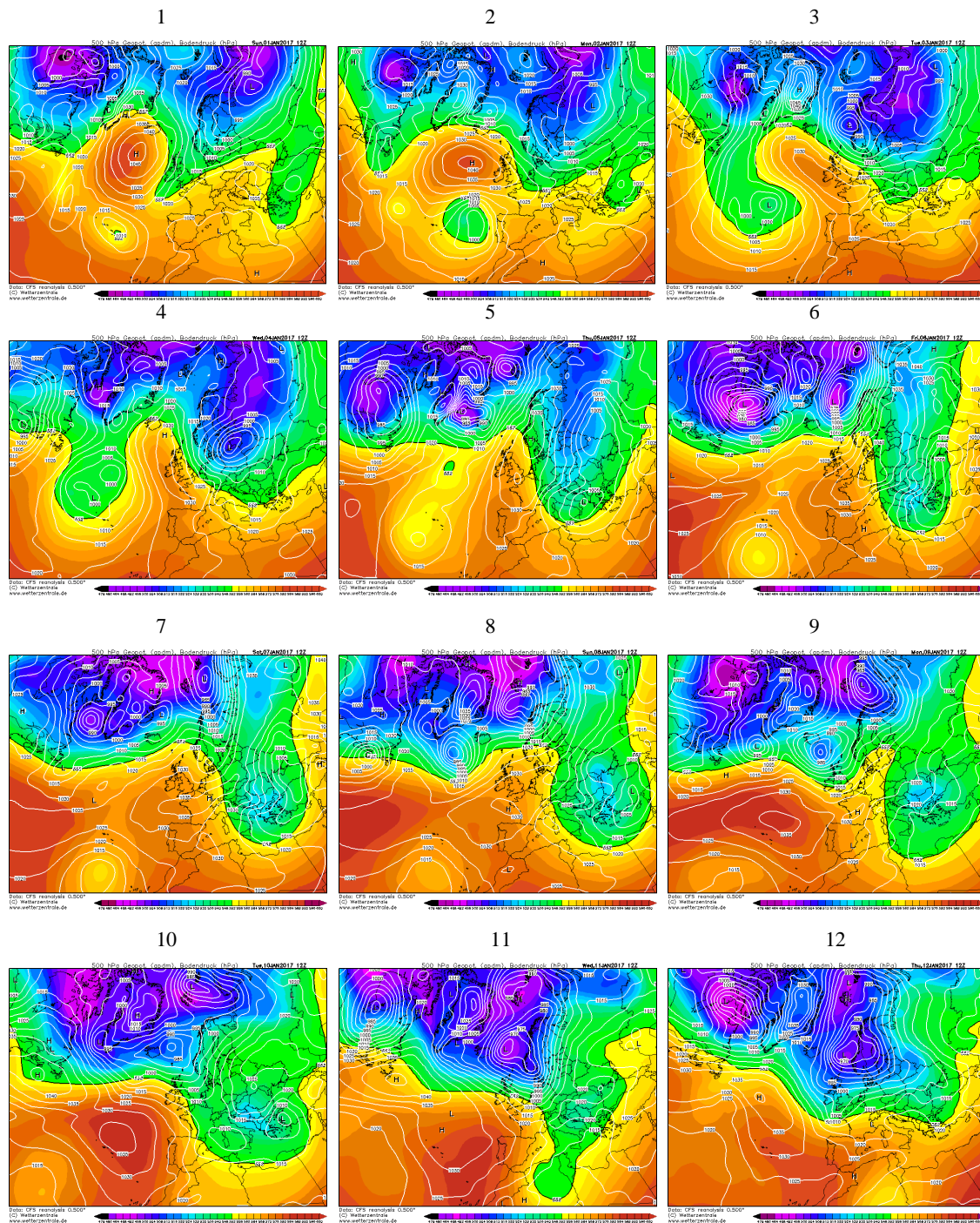
Sunyer, J. et al. (1996). Air pollution and mortality in Barcelona. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 50, p. 76-80.

Svensson, M. et al. (1997). The Importance of green areas for the ventilation of the city. *Naturvardsverkets*.

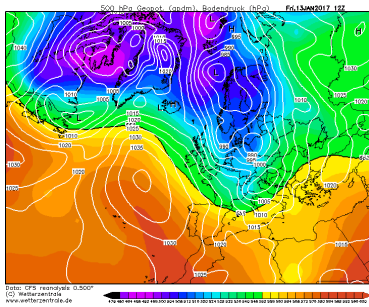
ANEXOS

Mapas sinópticos diarios de superficie y de 500 hPa del año 2017 (Fuente: Wetterzentrale).

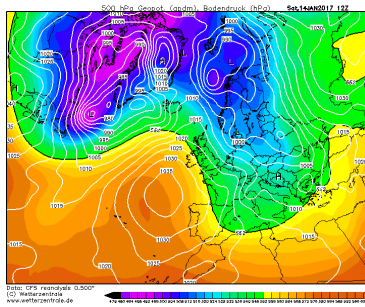
Enero



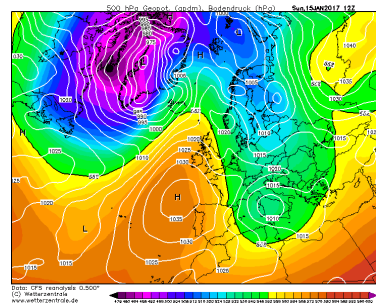
13



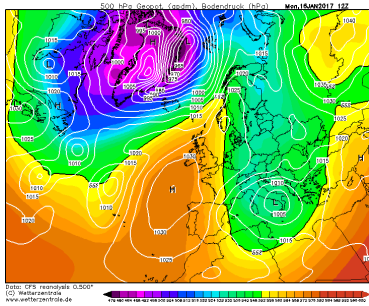
14



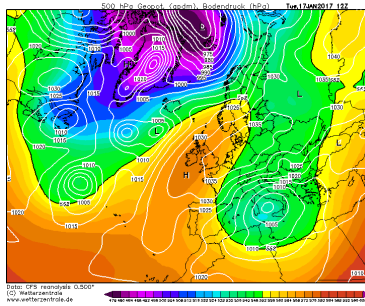
15



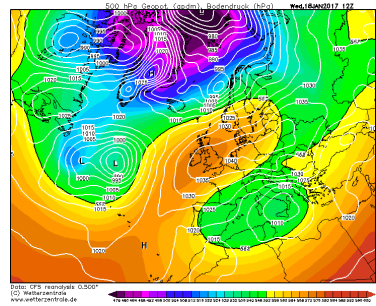
16



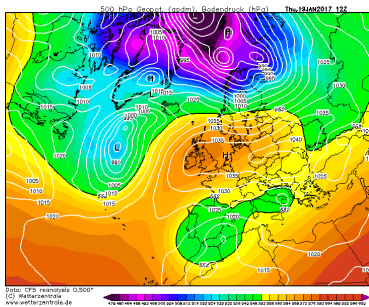
17



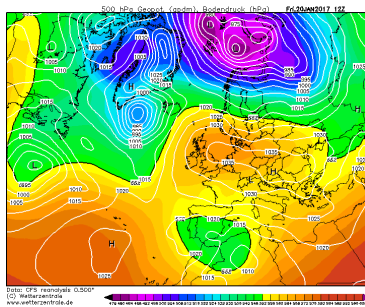
18



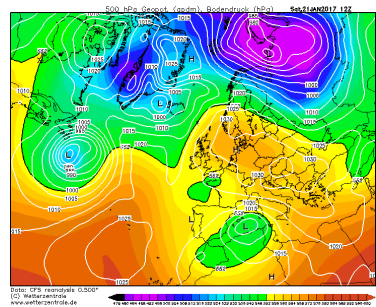
19



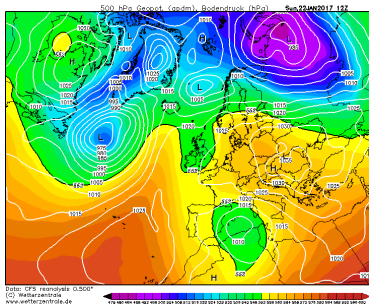
20



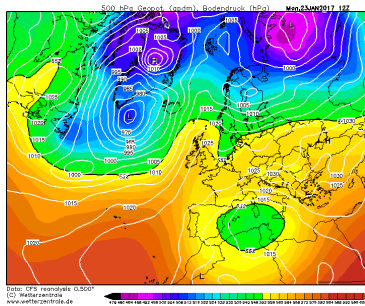
21



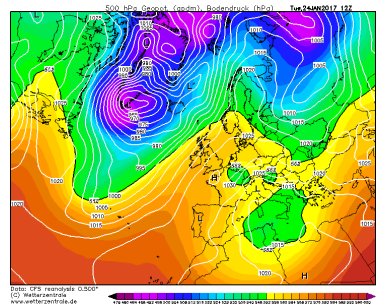
22



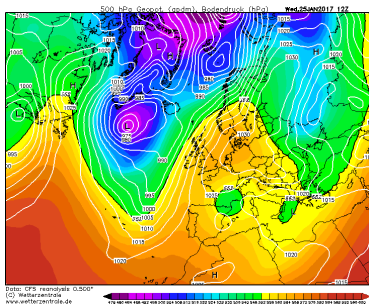
23



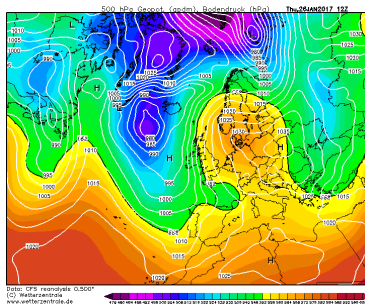
24



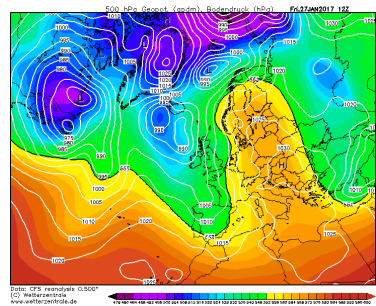
25



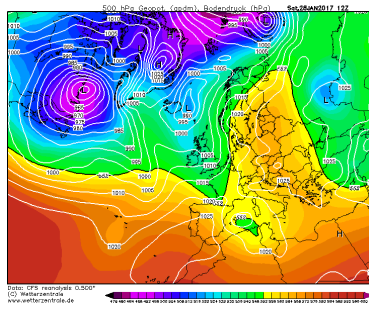
26



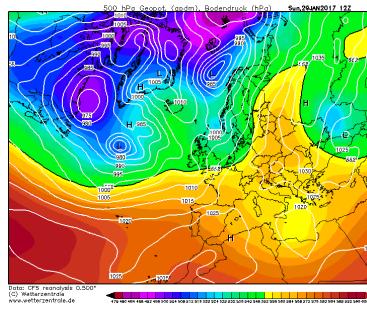
27



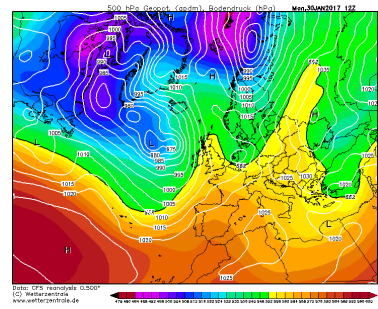
28



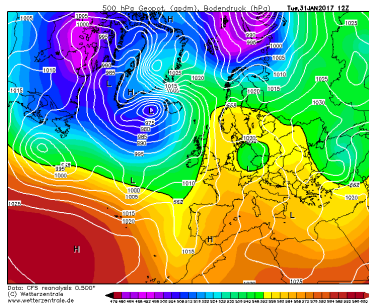
29



30

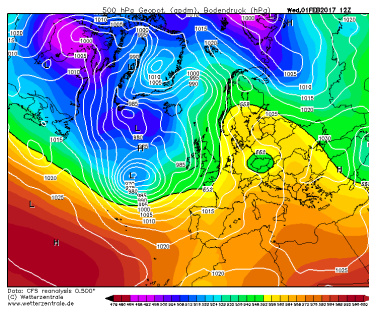


31

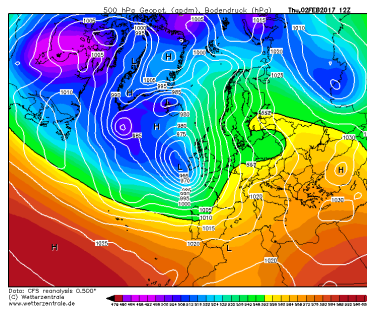


Febrero

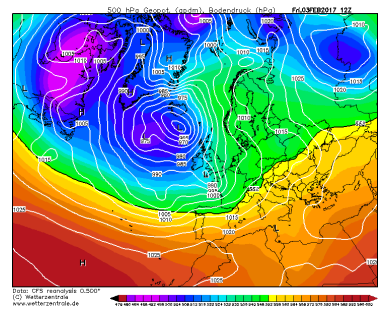
1



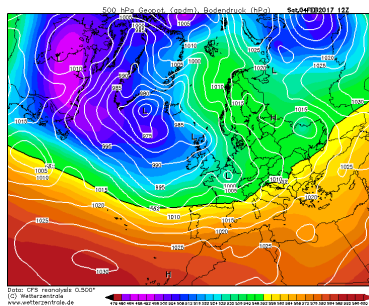
2



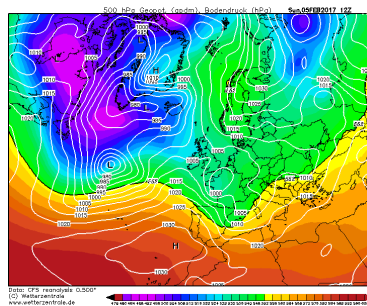
3



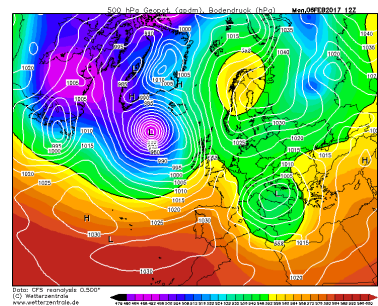
4



5



6



7

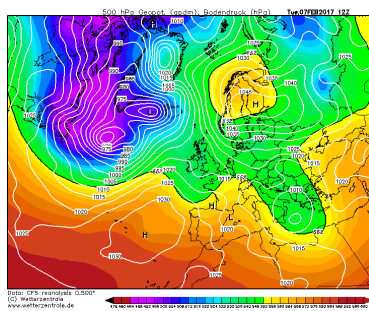


8

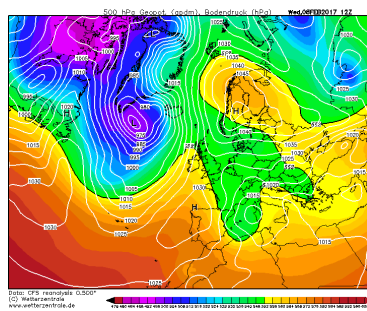


9

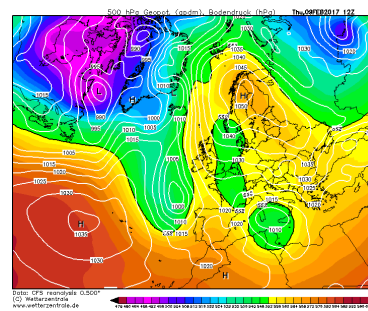




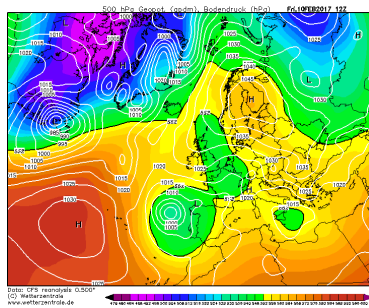
10



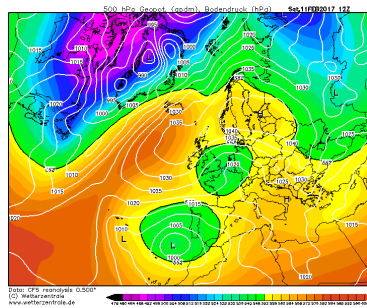
11



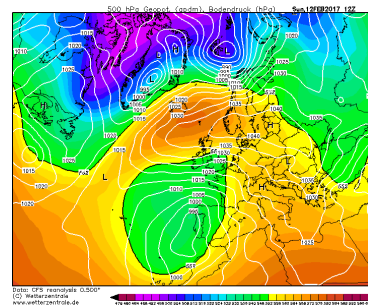
12



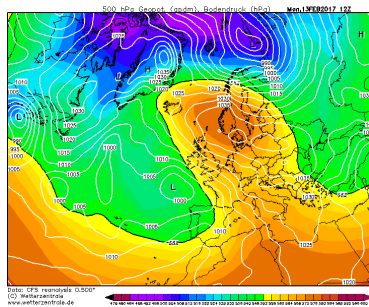
13



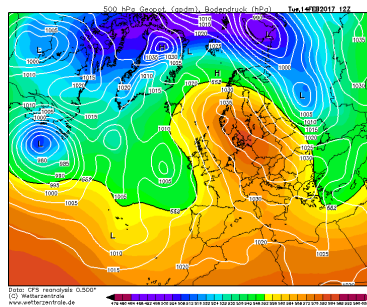
14



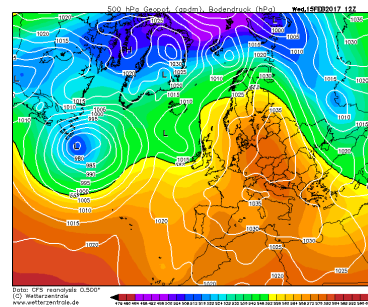
15



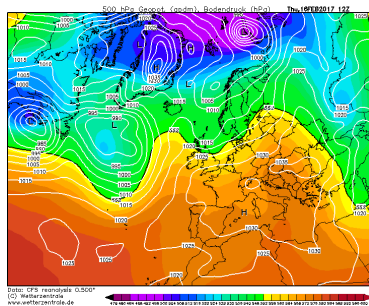
16



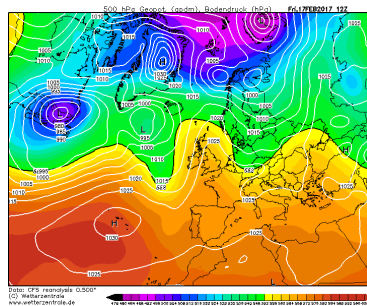
17



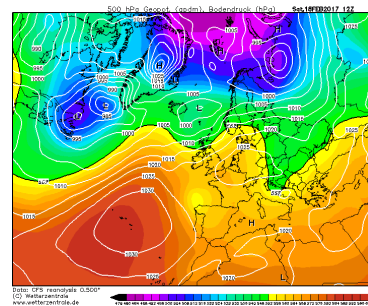
18



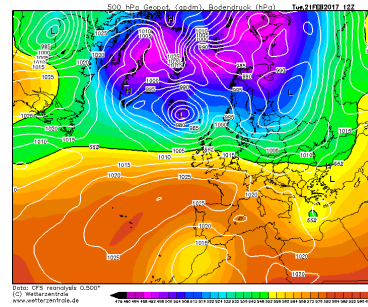
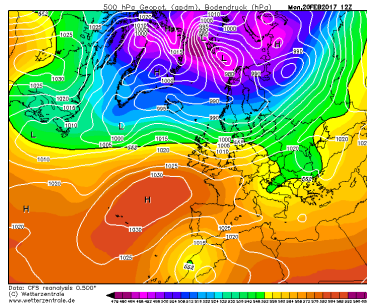
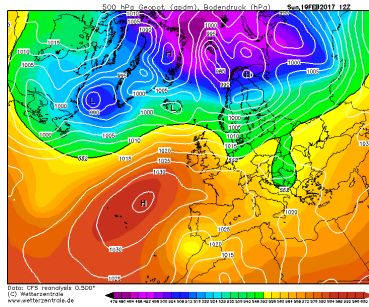
19



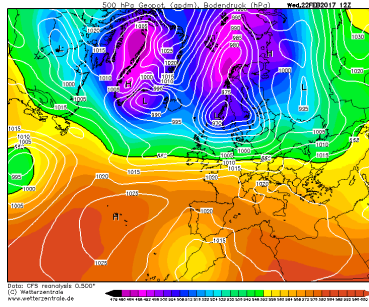
20



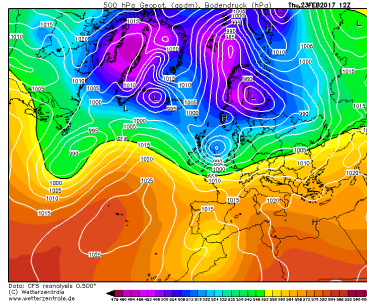
21



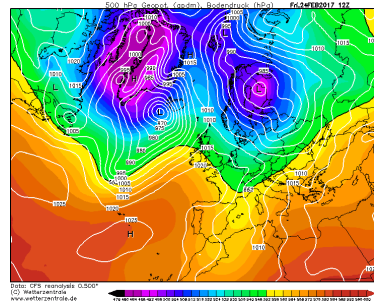
22



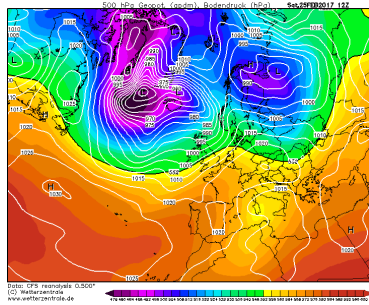
23



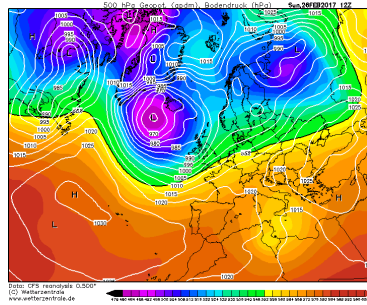
24



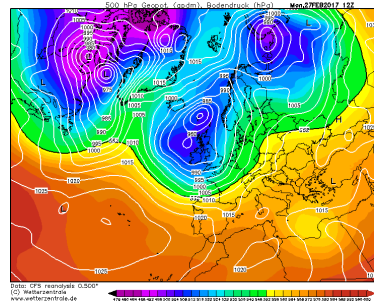
25



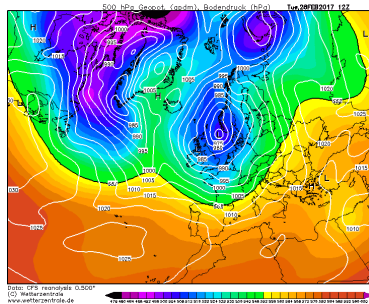
26



27

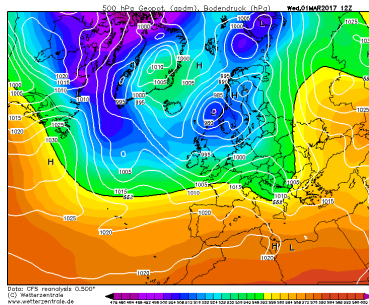


28

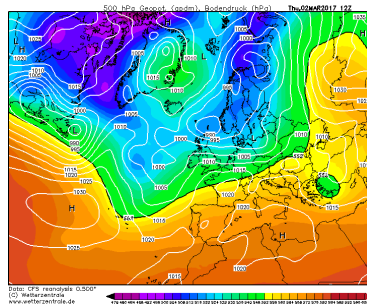


Marzo

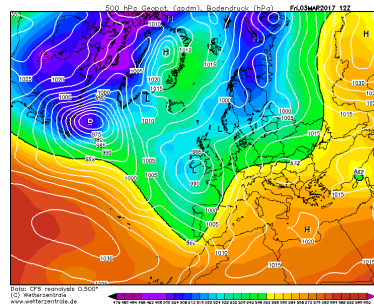
1



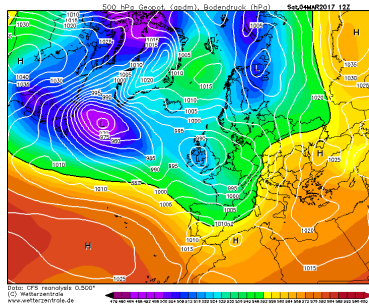
2



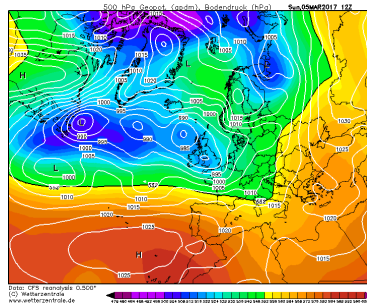
3



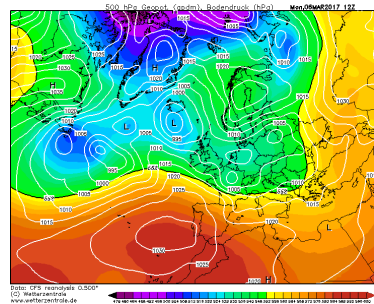
4



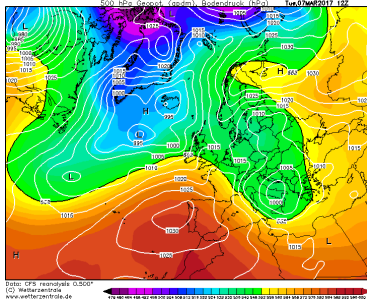
5



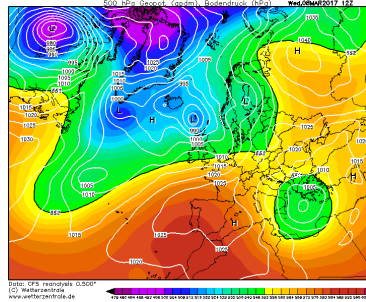
6



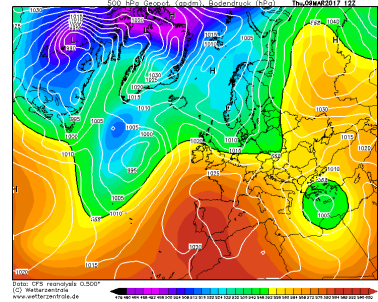
7



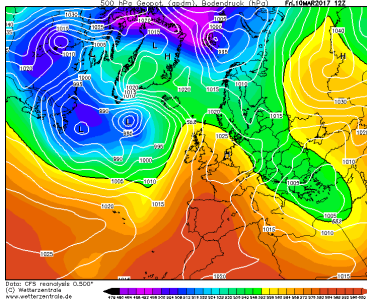
8



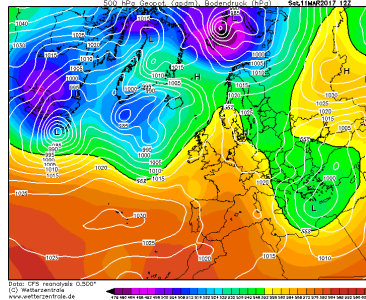
9



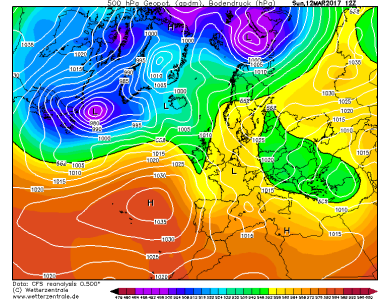
10



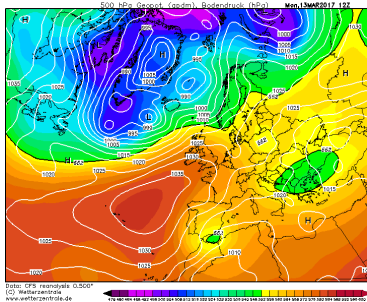
11



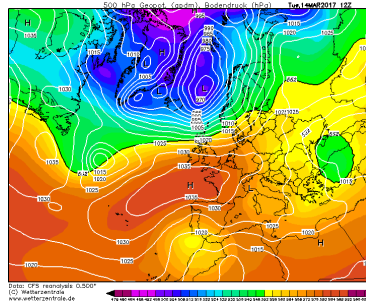
12



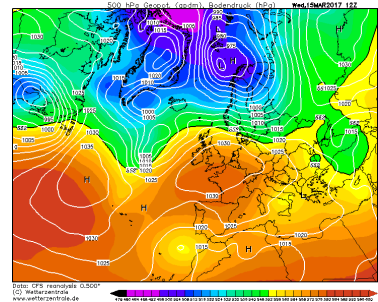
13



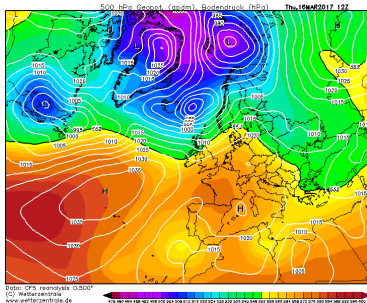
14



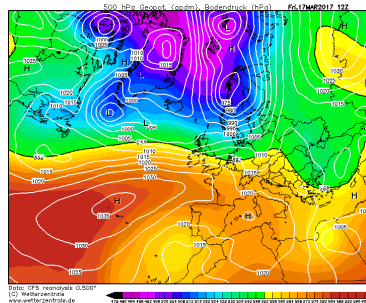
15



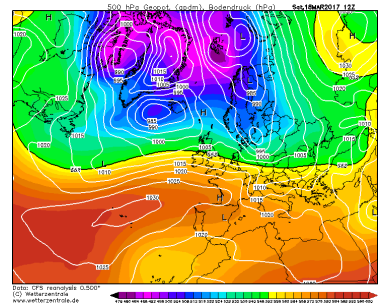
16



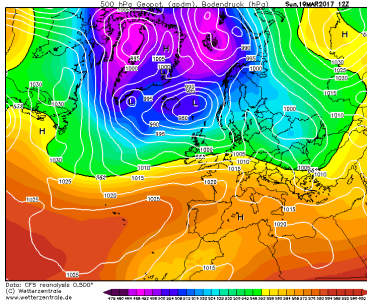
17



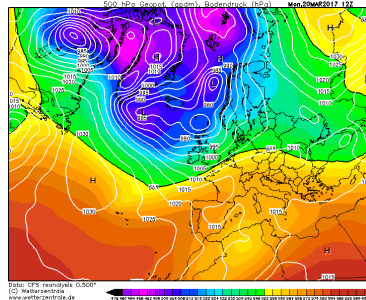
18



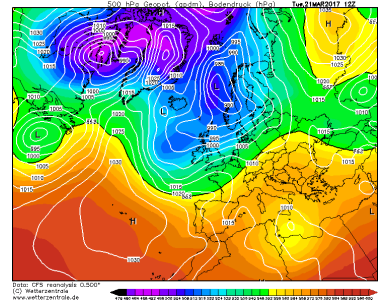
19



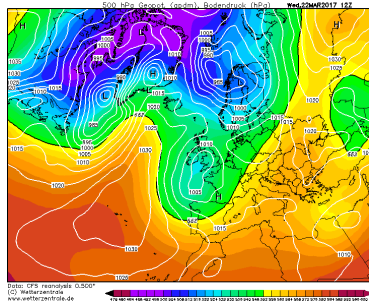
20



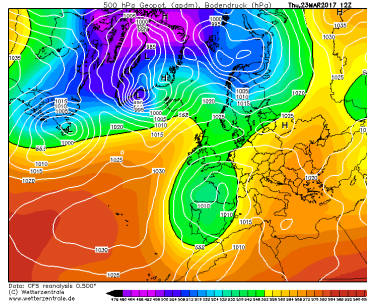
21



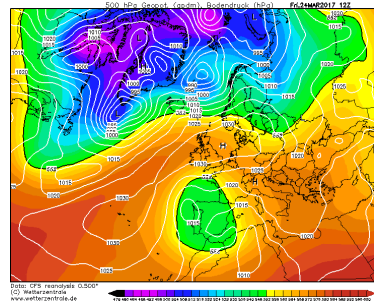
22



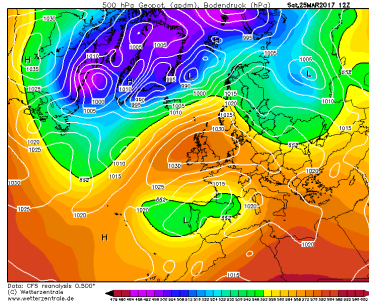
23



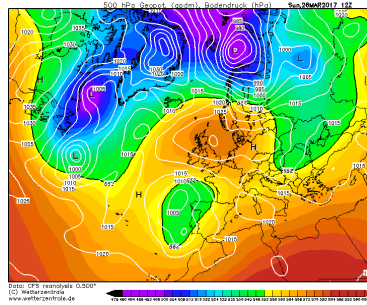
24



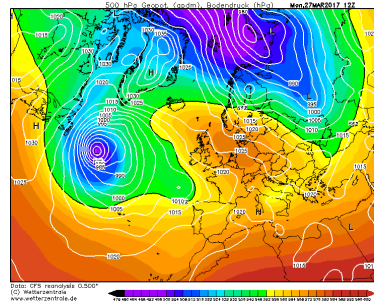
25



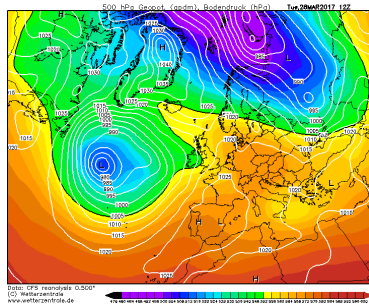
26



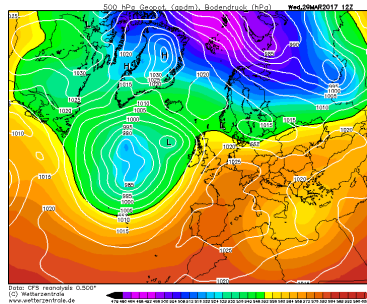
27



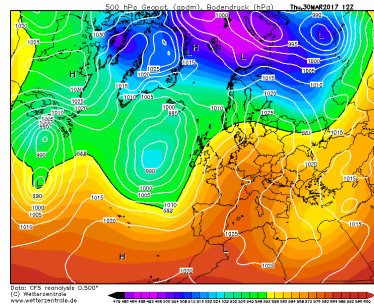
28



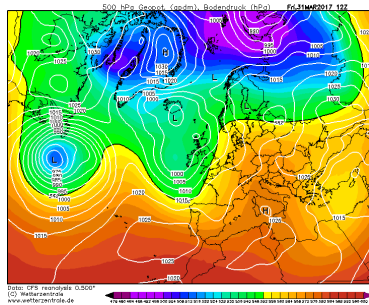
29



30

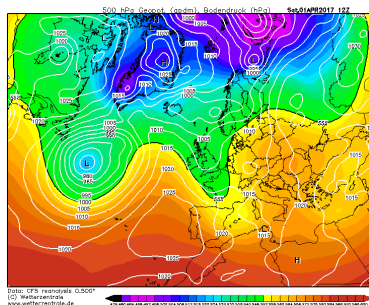


31

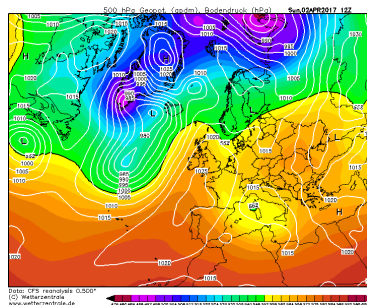


Abril

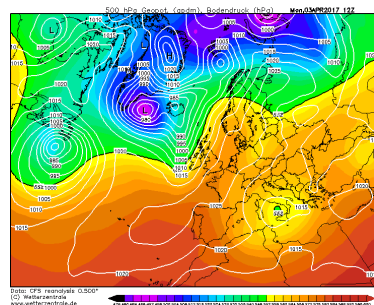
1

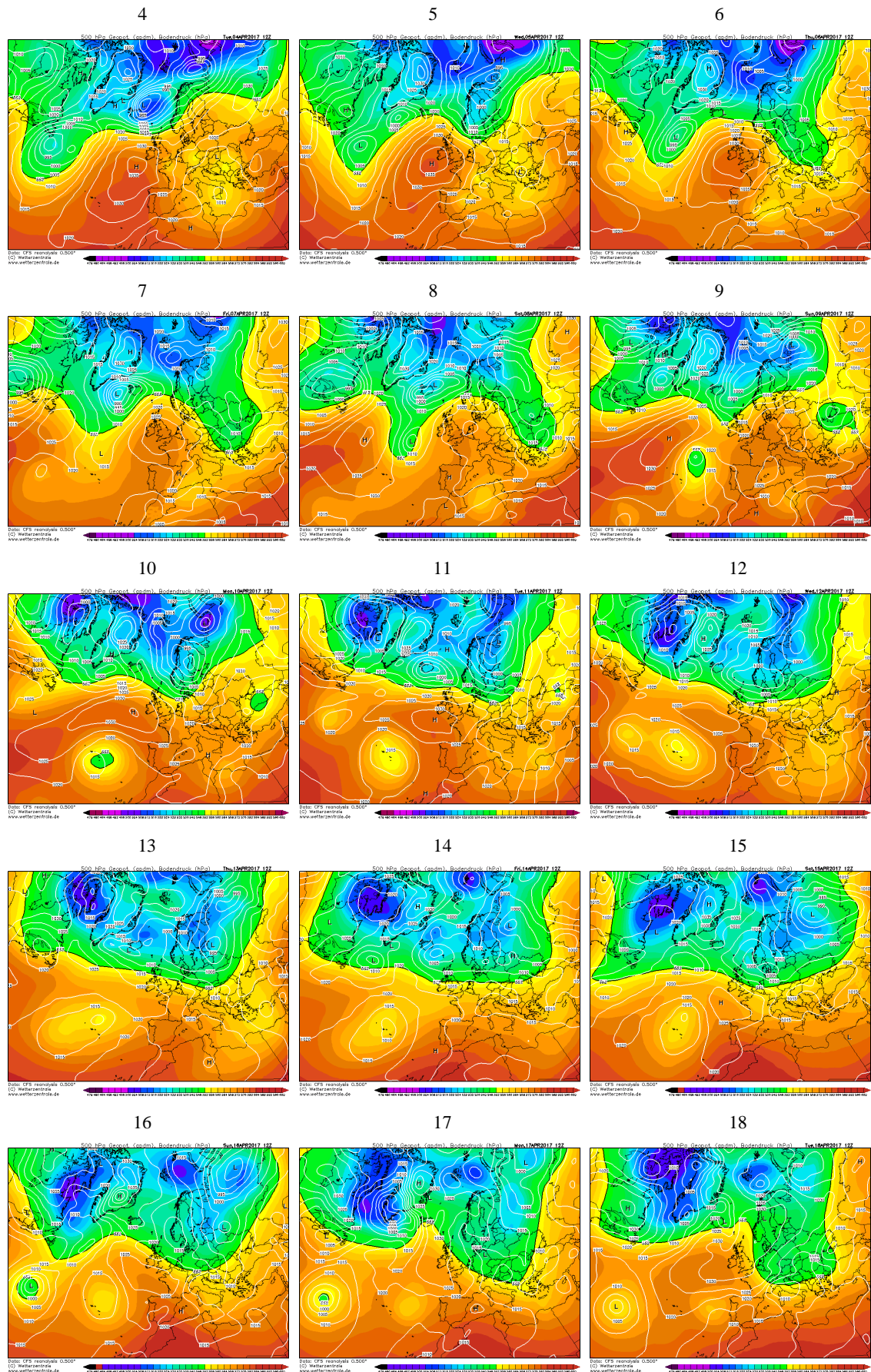


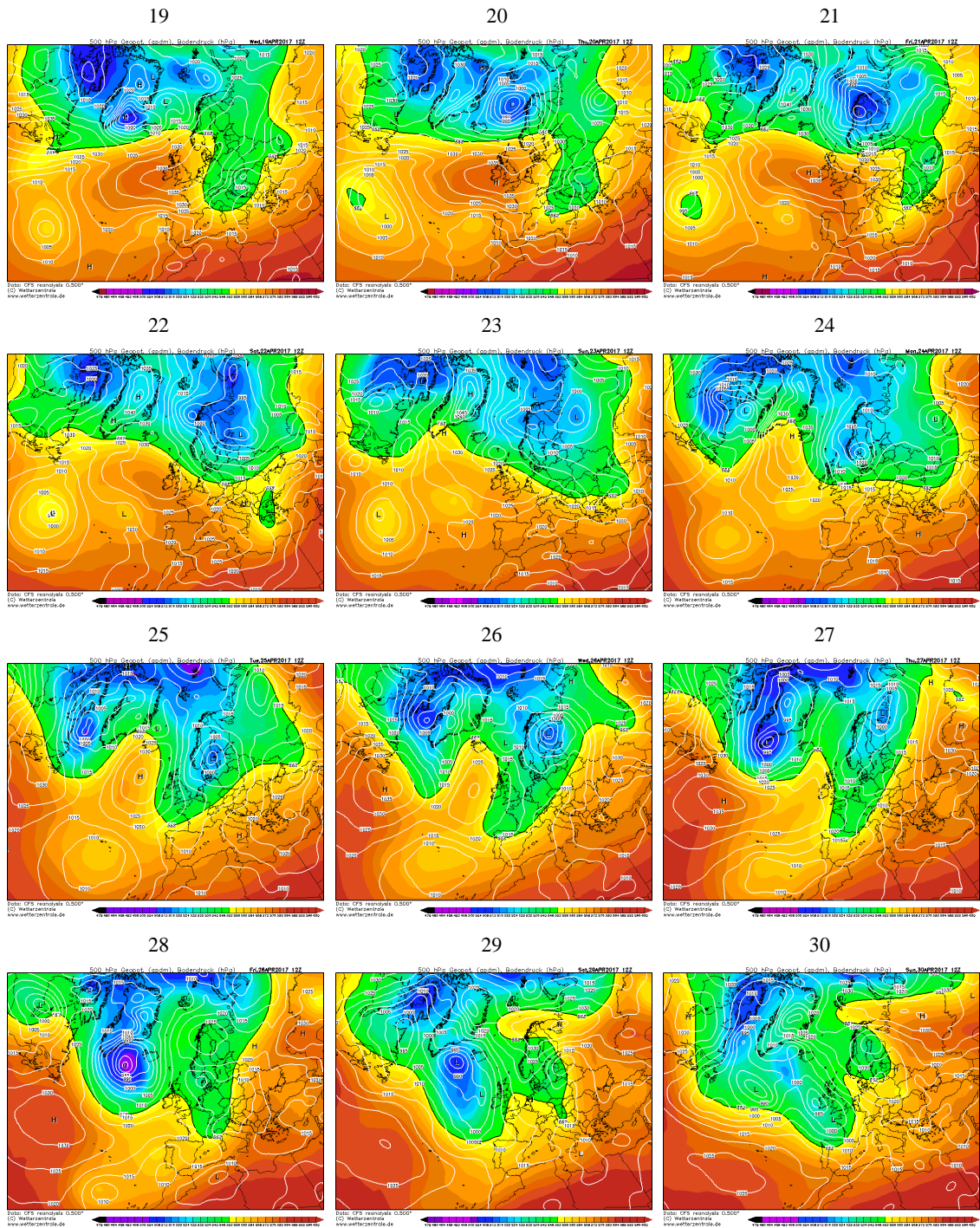
2



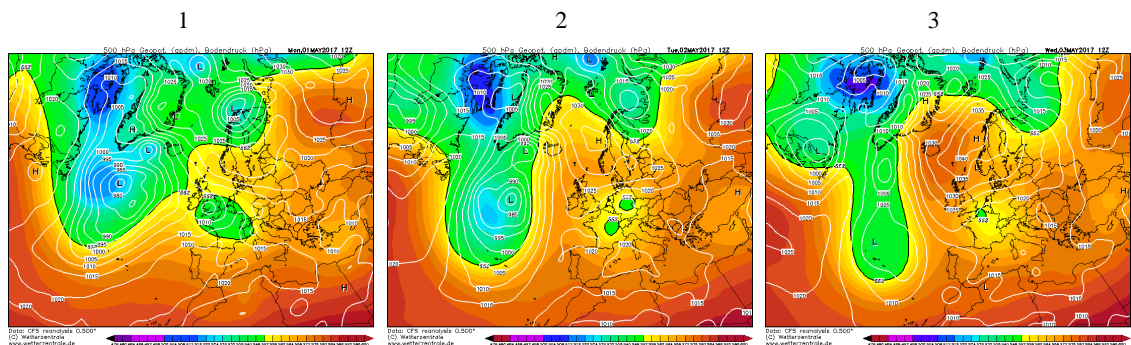
3

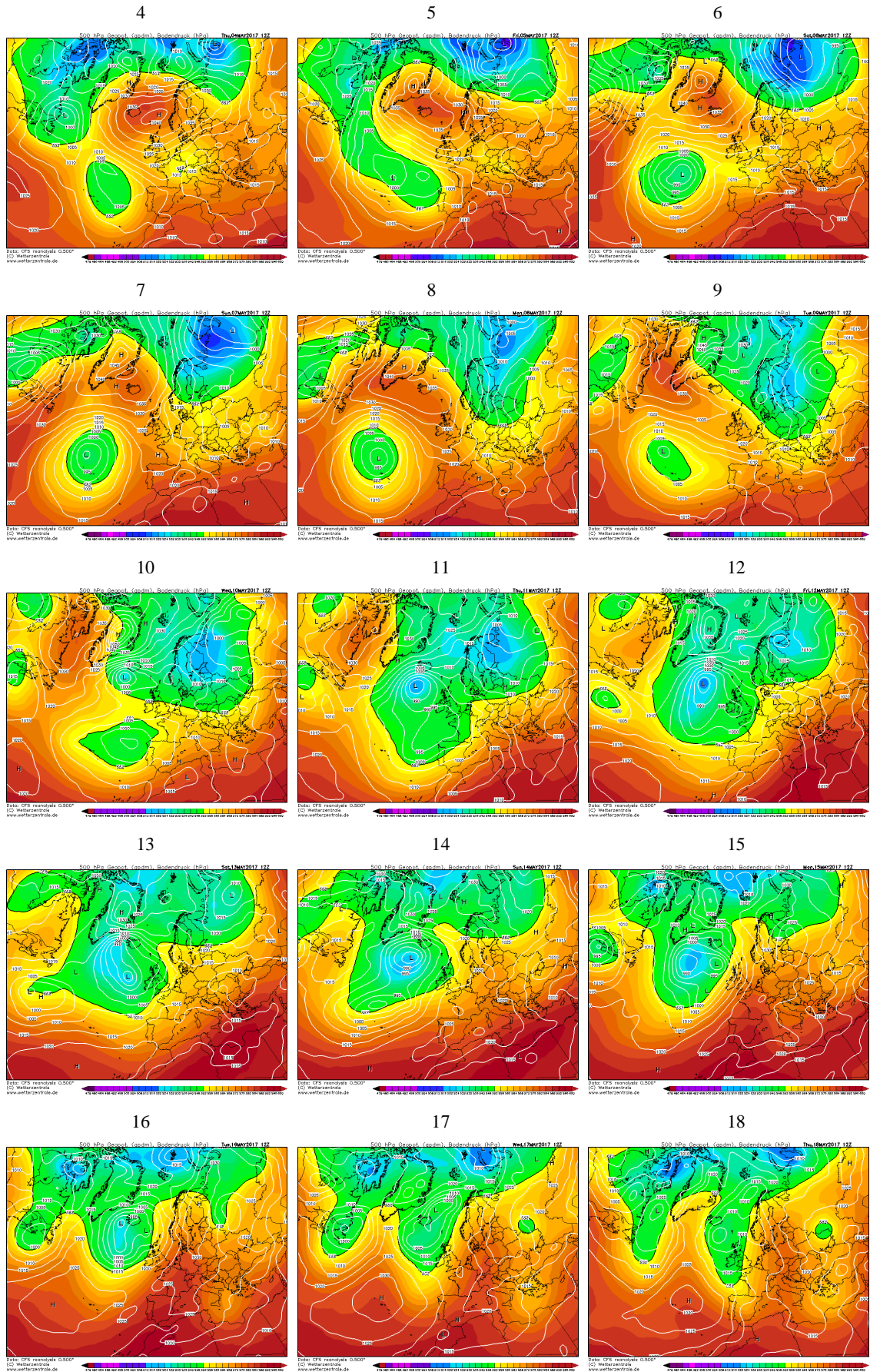


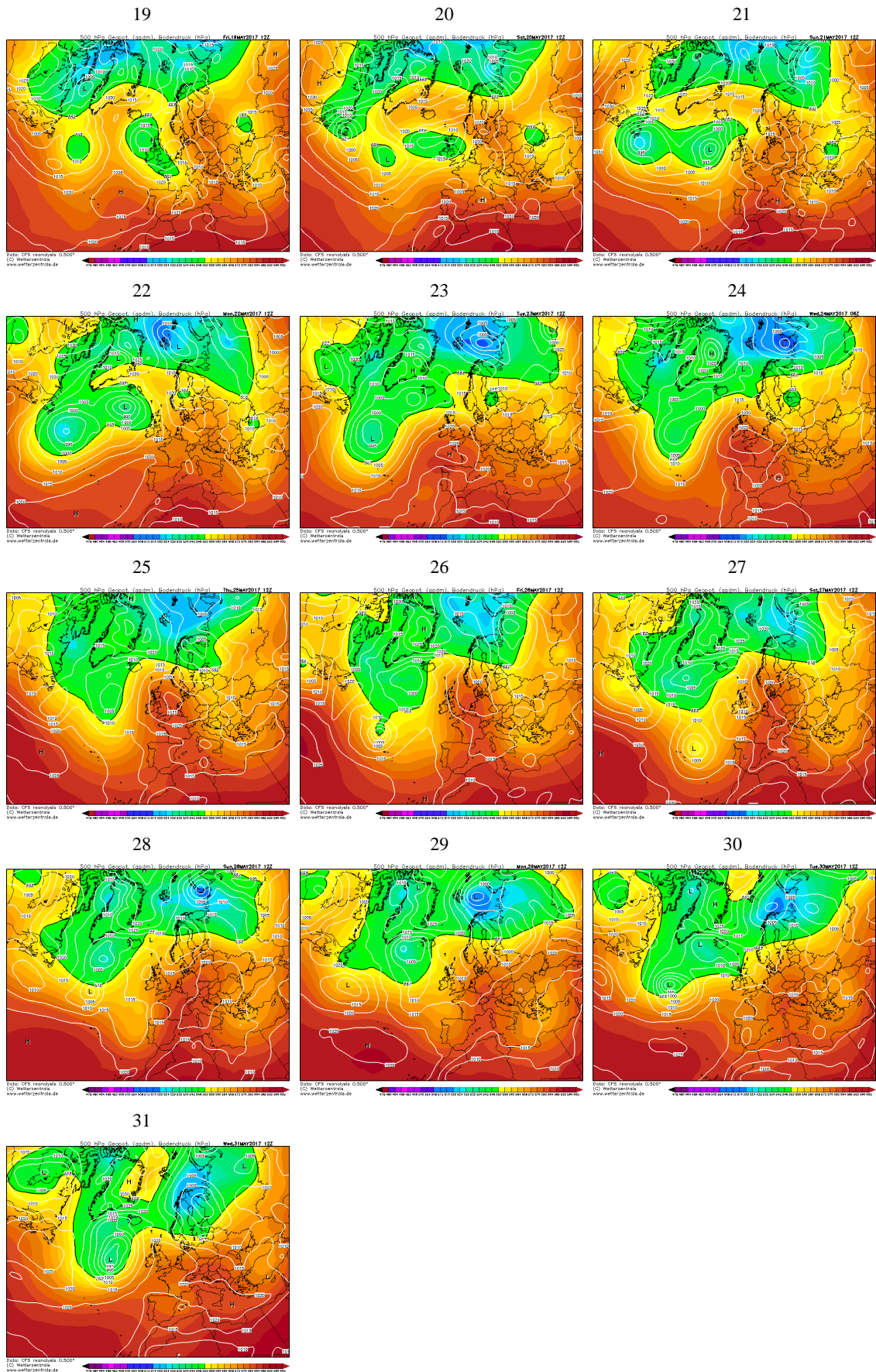




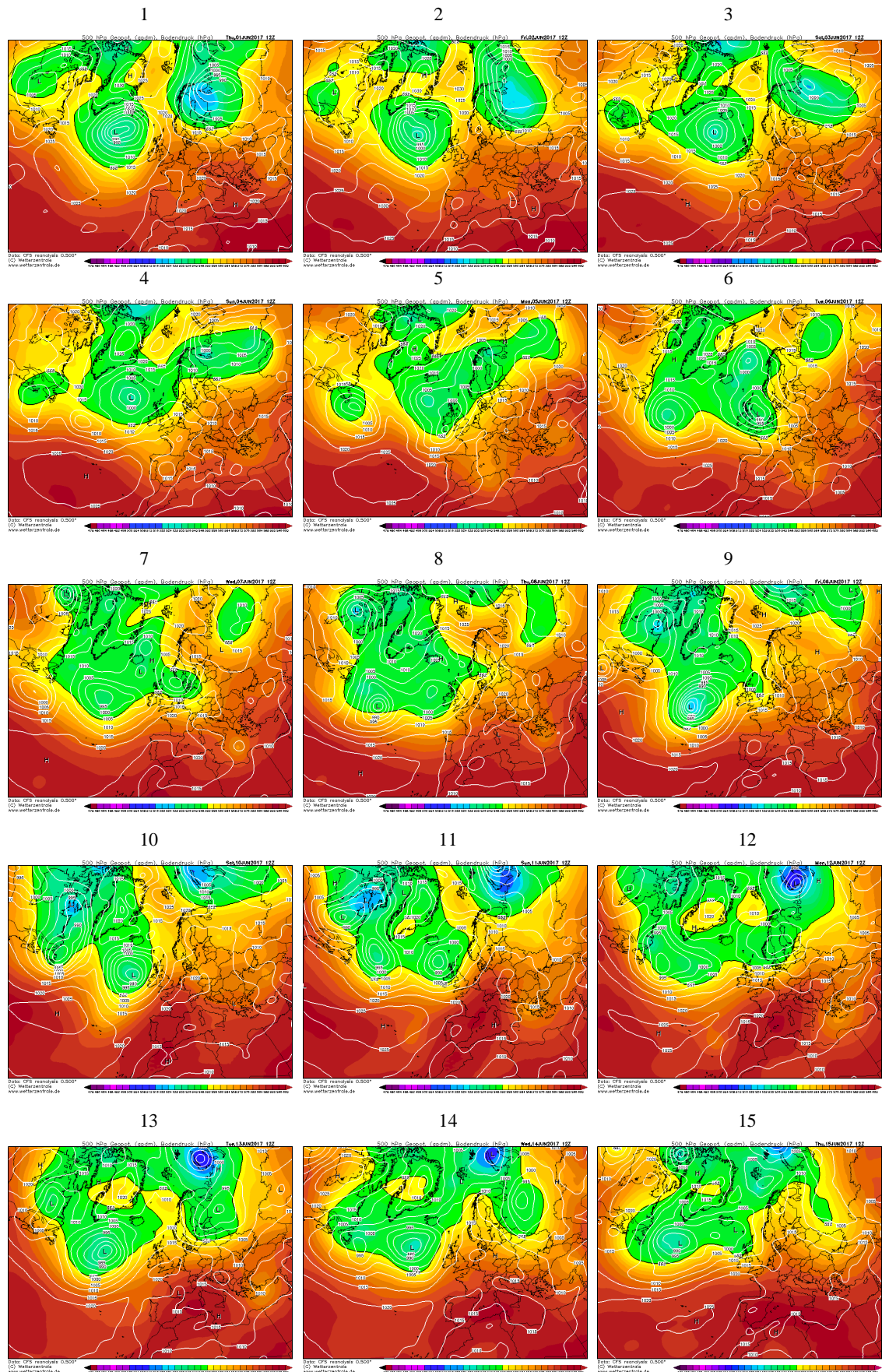
Mayo

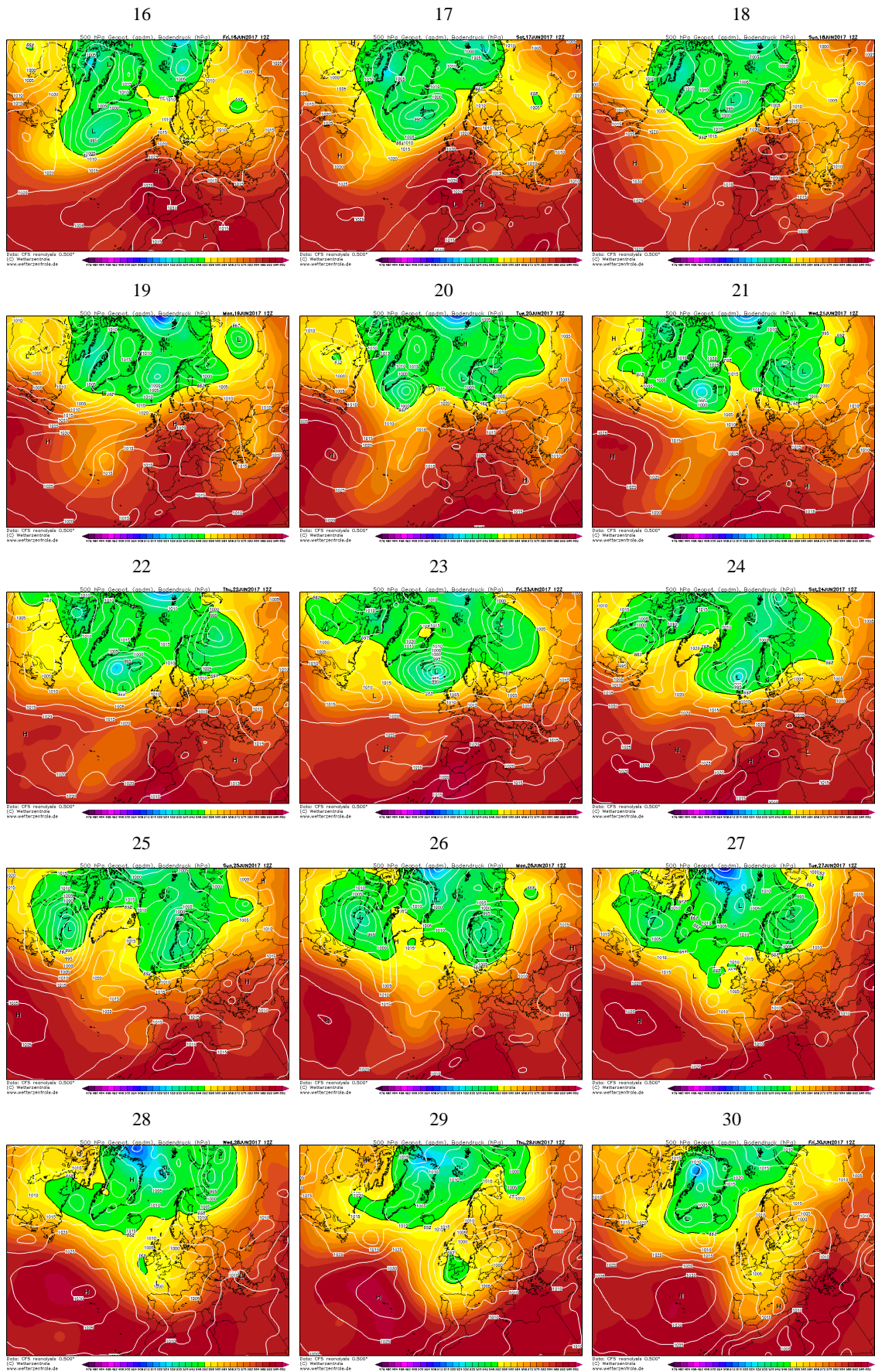




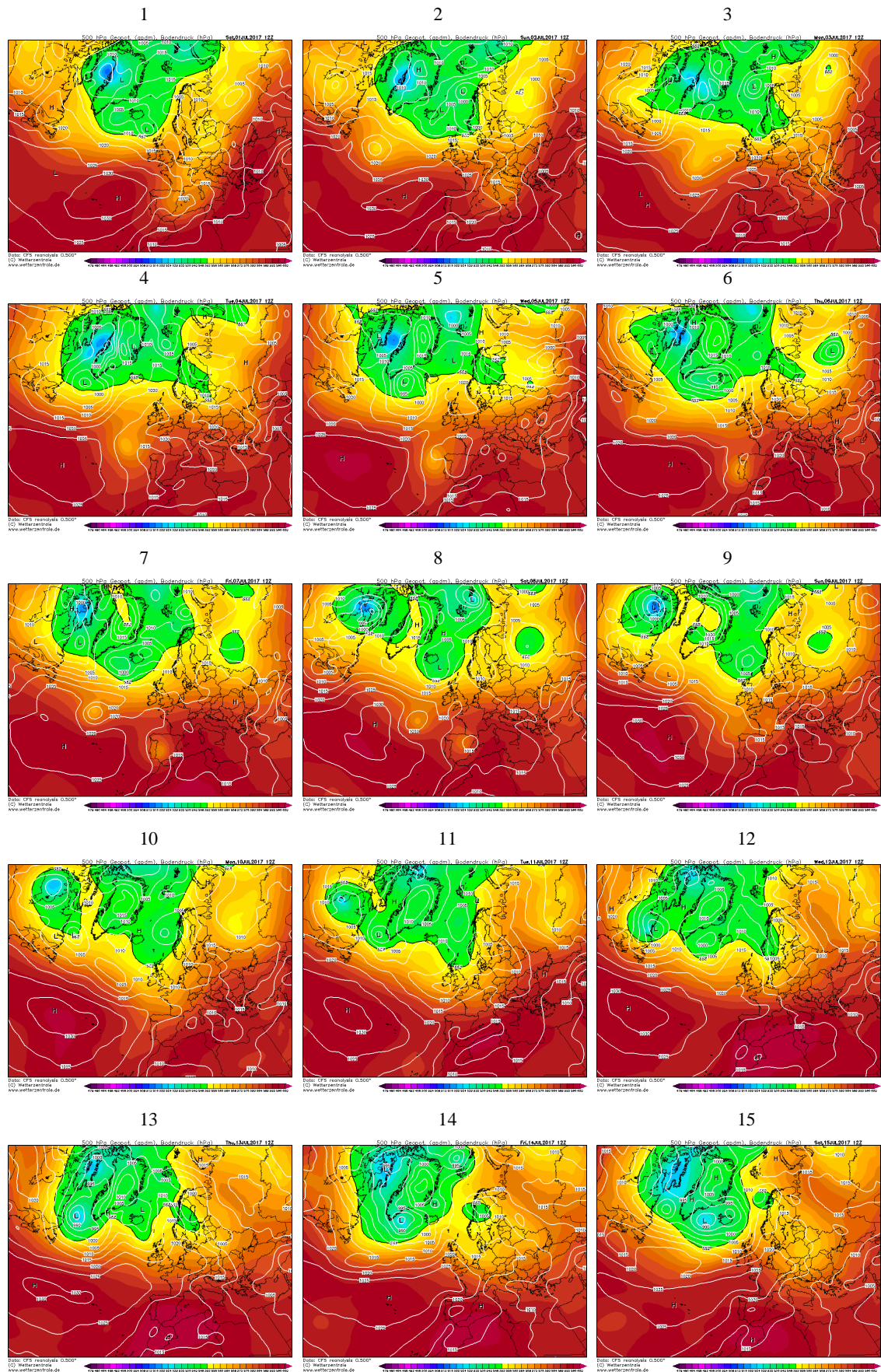


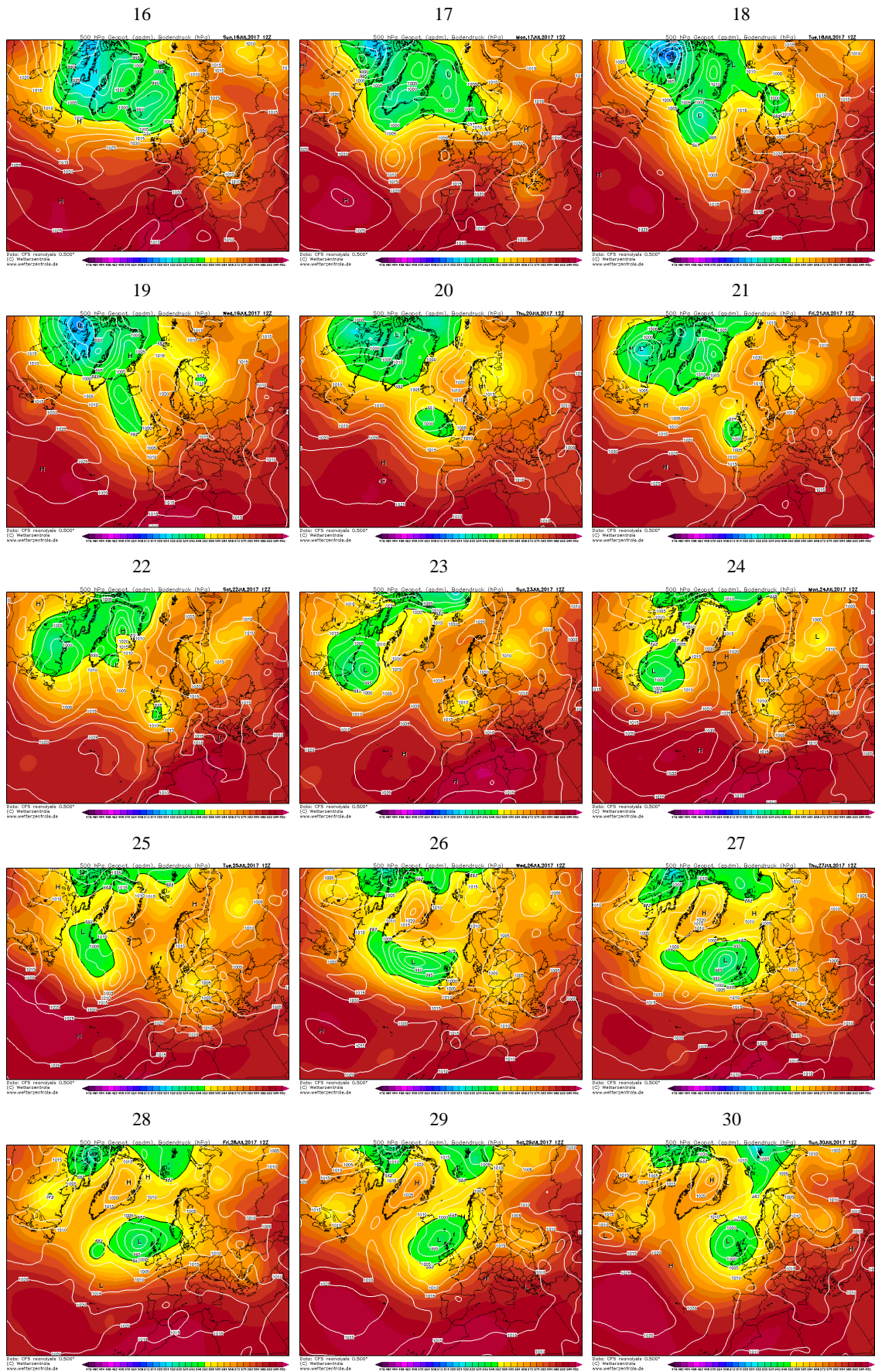
Junio

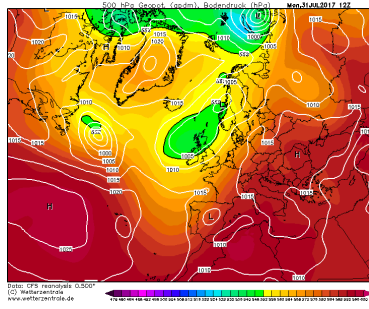




Julio

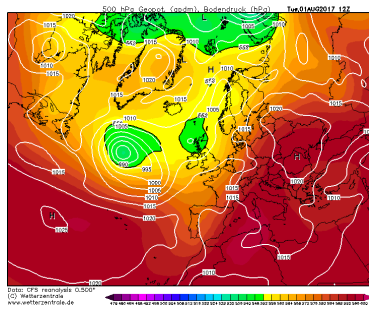




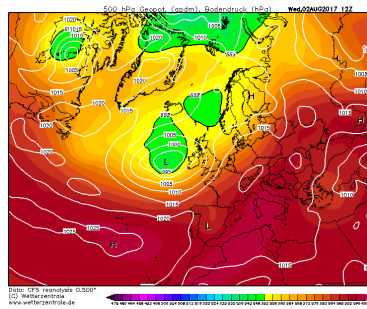


Agosto

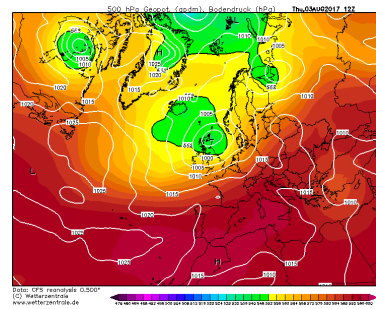
1



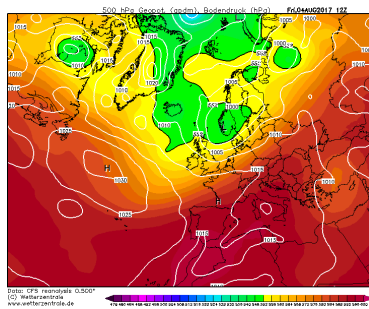
2



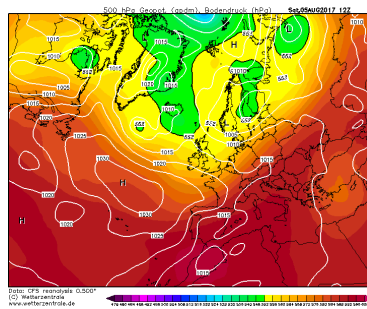
3



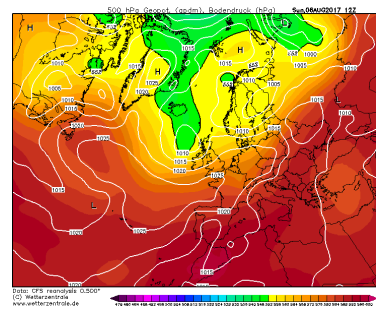
4



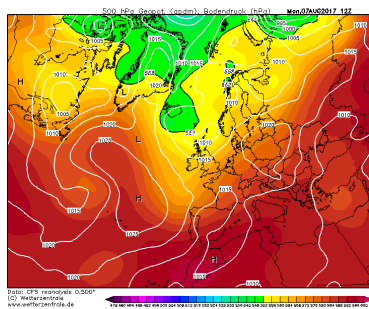
5



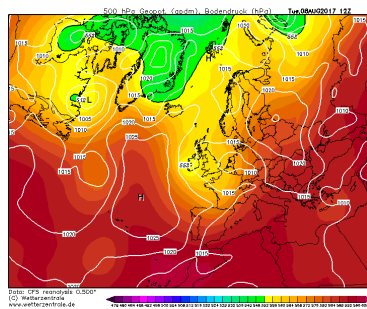
6



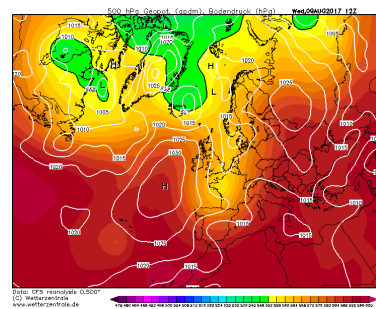
7



8



9



10

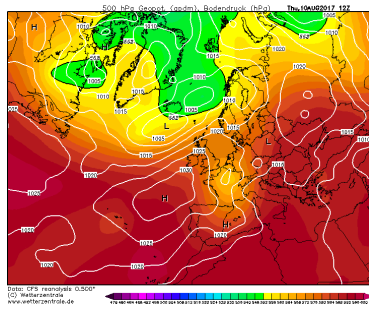


11

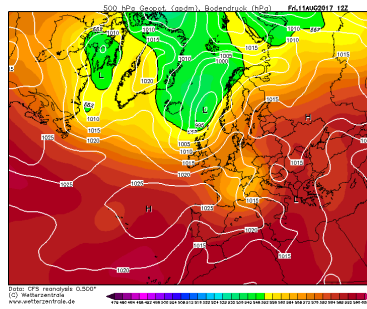


12

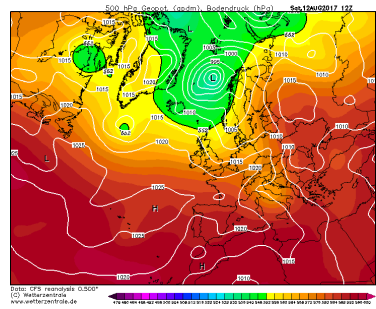




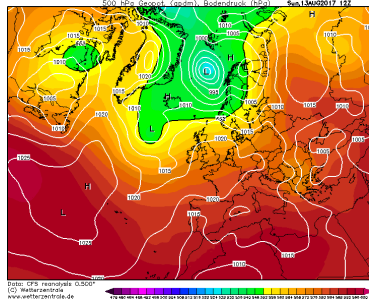
13



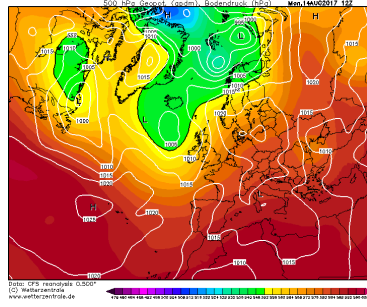
14



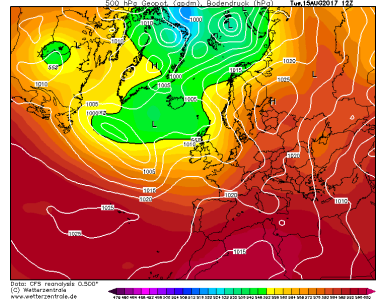
15



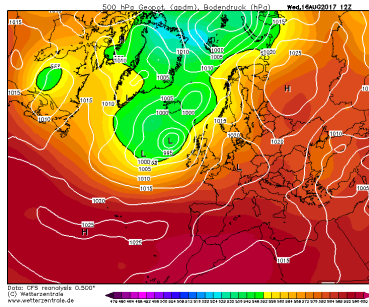
16



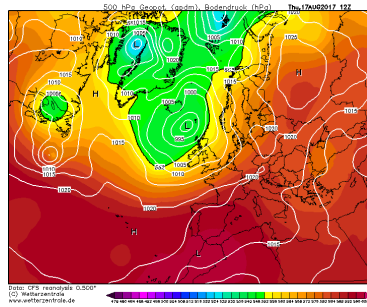
17



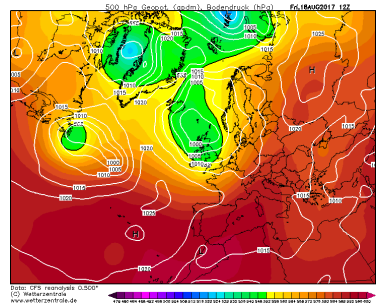
18



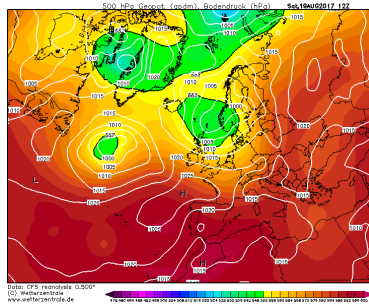
19



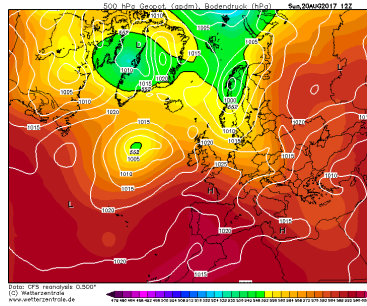
20



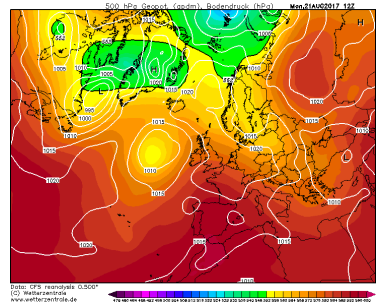
21



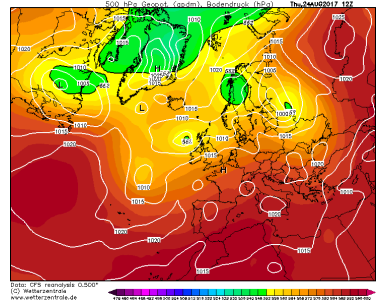
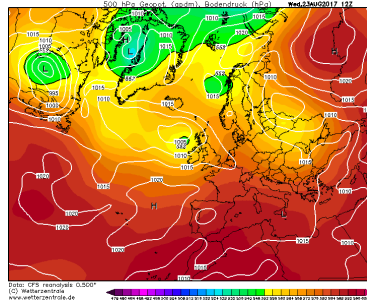
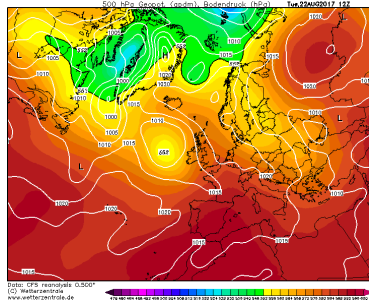
22



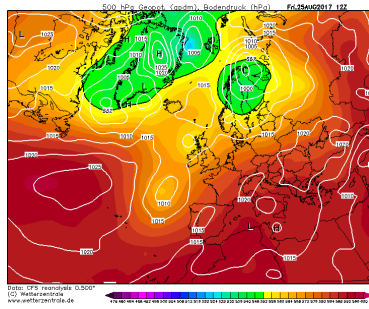
23



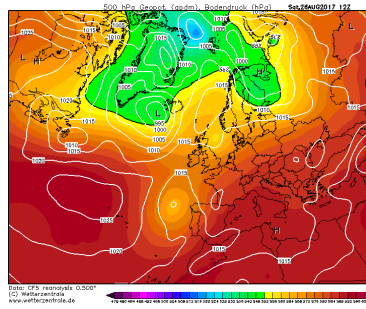
24



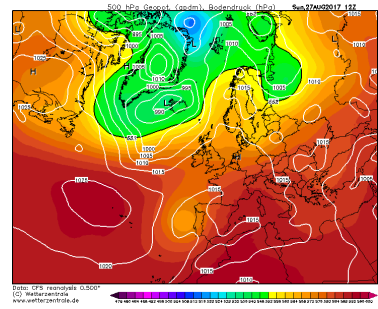
25



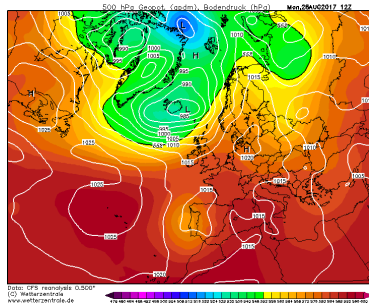
26



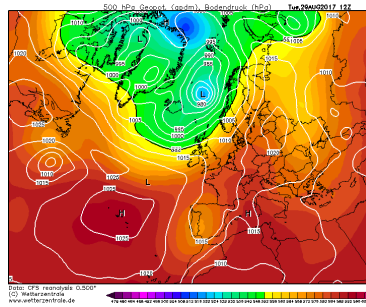
27



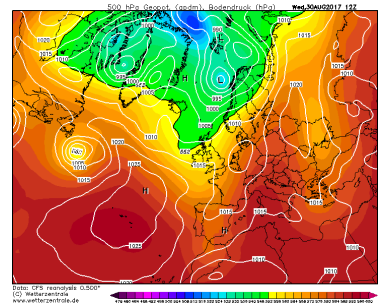
28



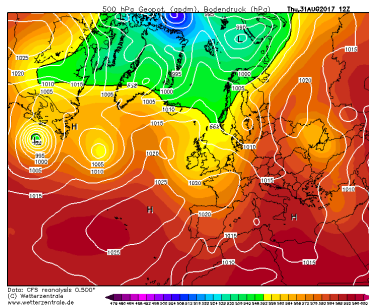
29



30

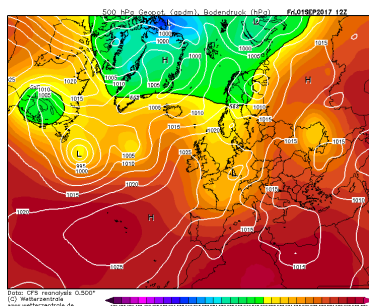


31

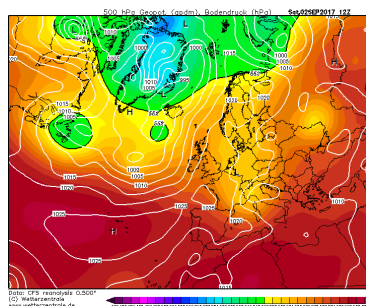


Septiembre

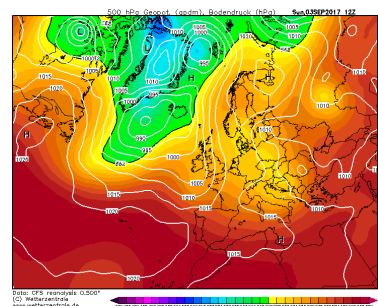
1



2



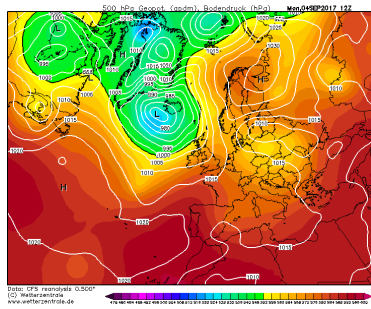
3



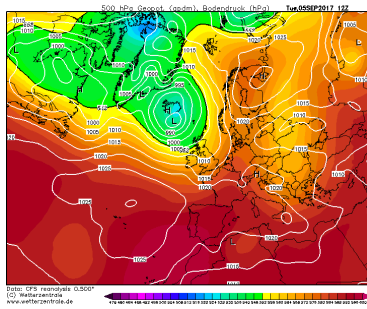
4

5

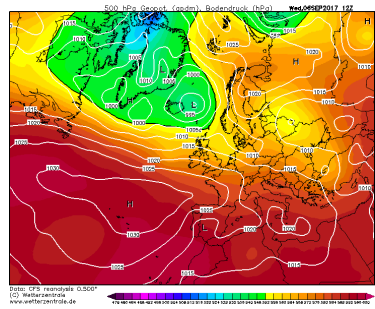
6



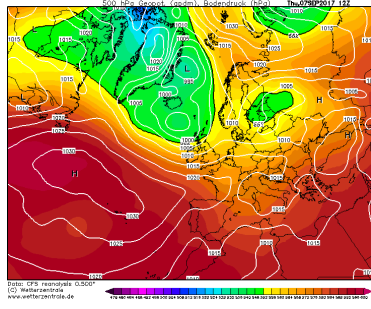
7



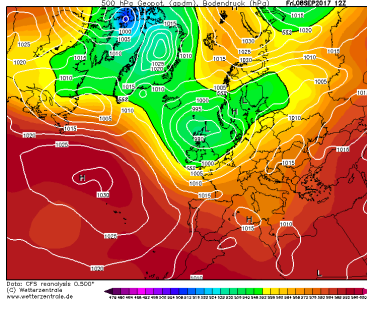
8



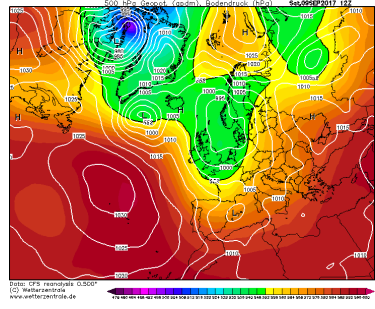
9



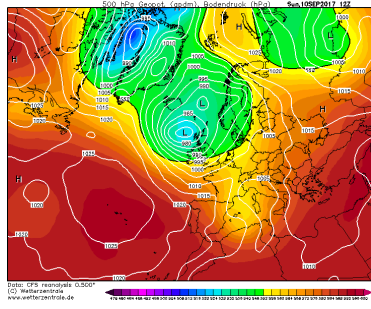
10



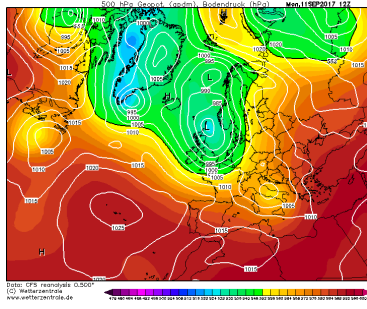
11



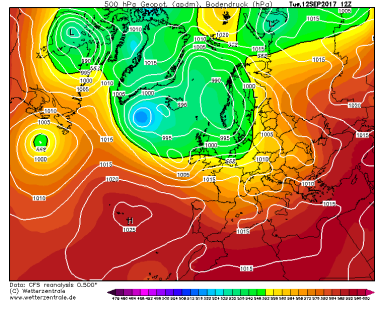
12



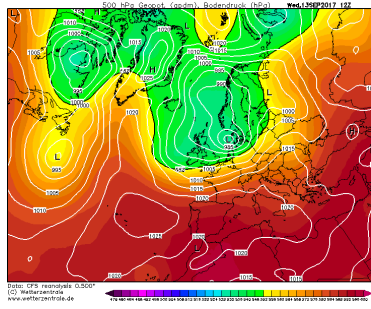
13



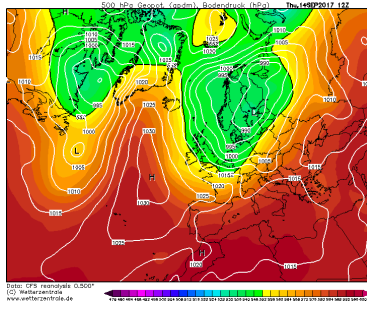
14



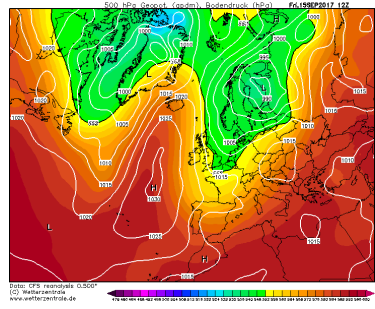
15



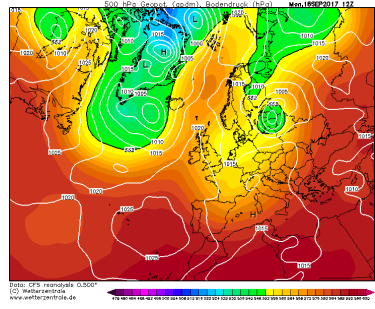
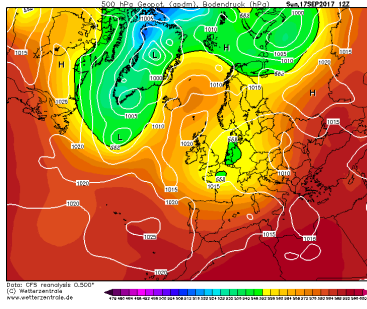
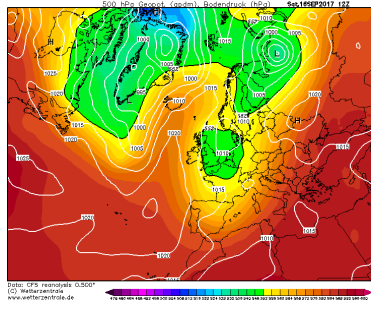
16

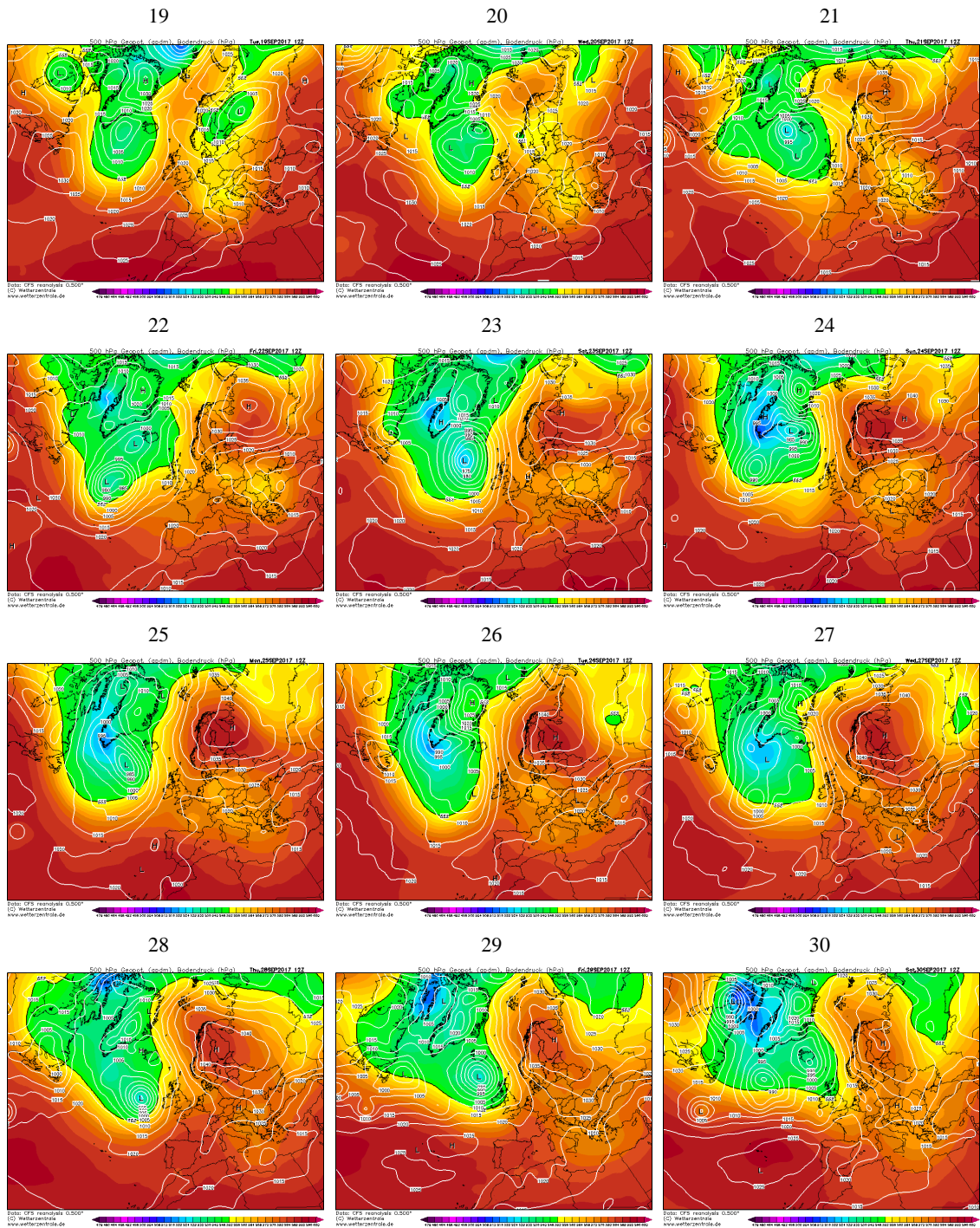


17

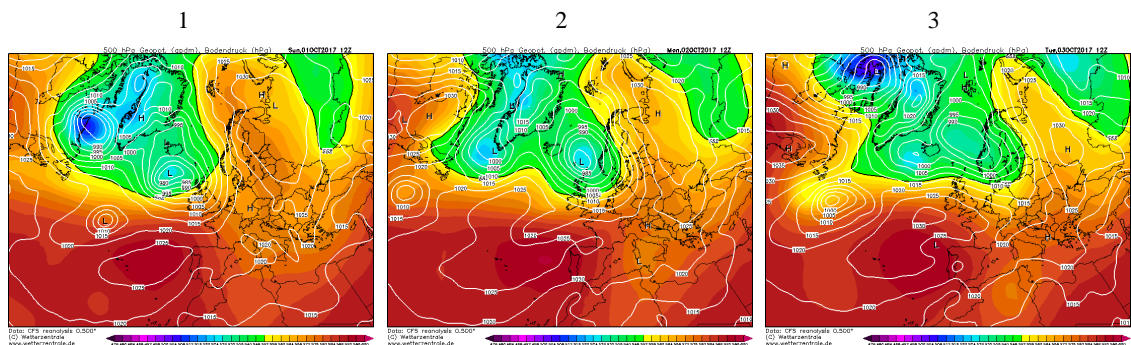


18

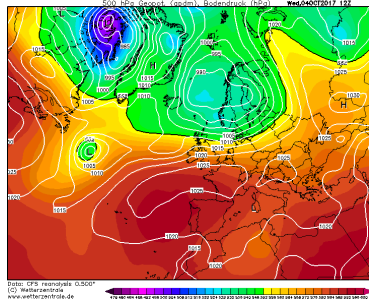




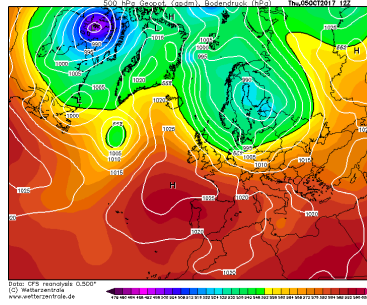
Octobre



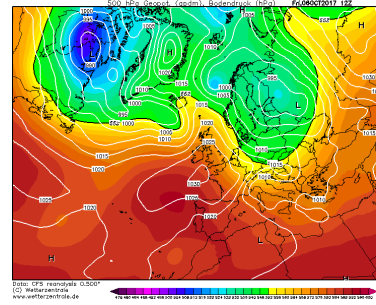
4



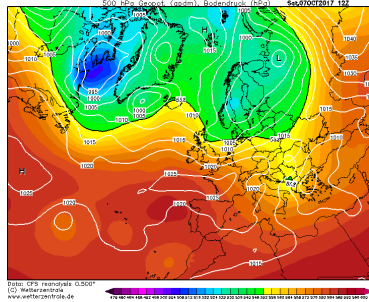
5



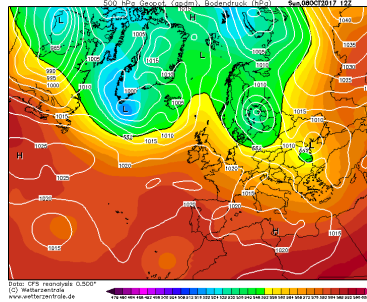
6



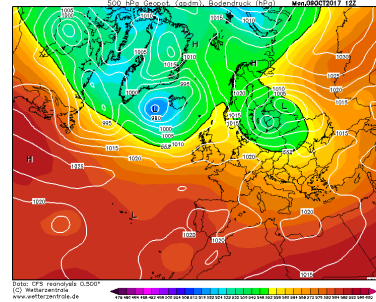
7



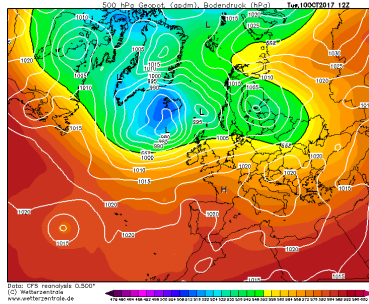
8



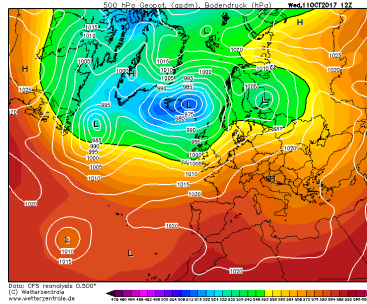
9



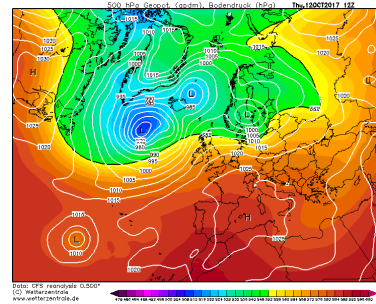
10



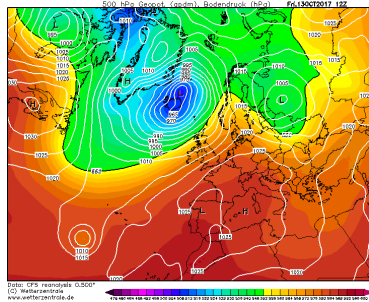
11



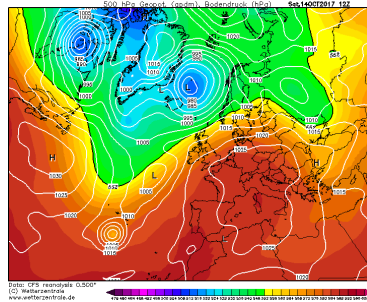
12



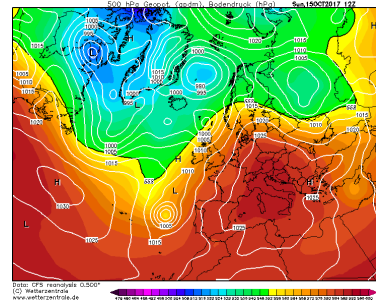
13



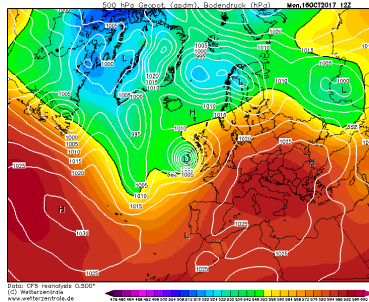
14



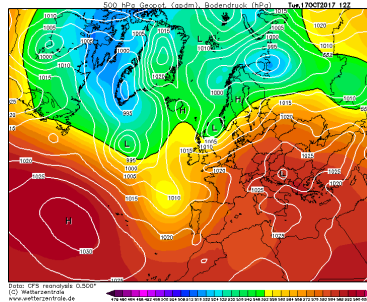
15



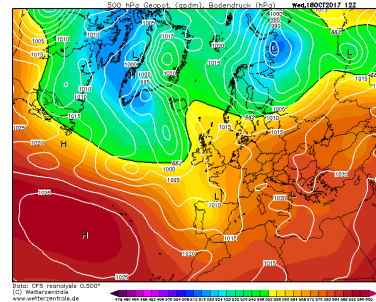
16



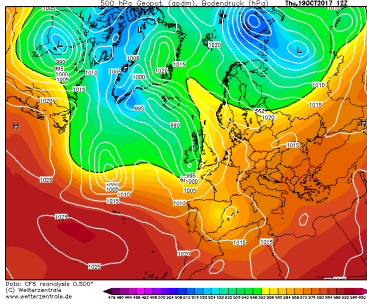
17



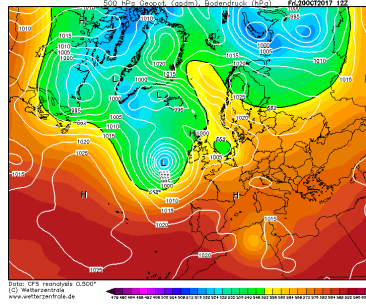
18



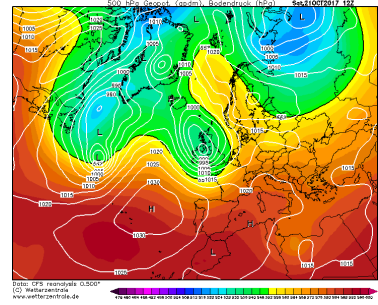
19



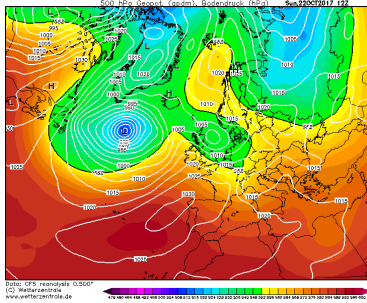
20



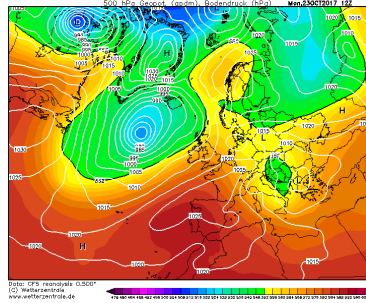
21



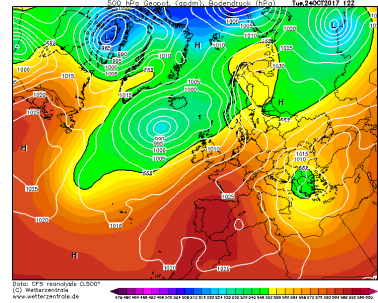
22



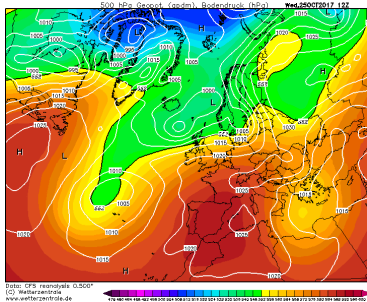
23



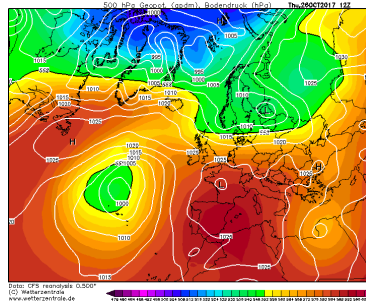
24



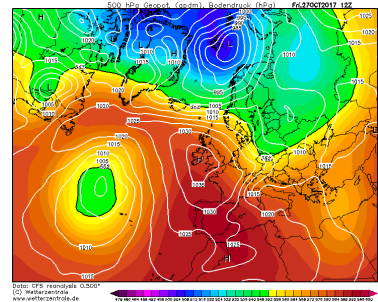
25



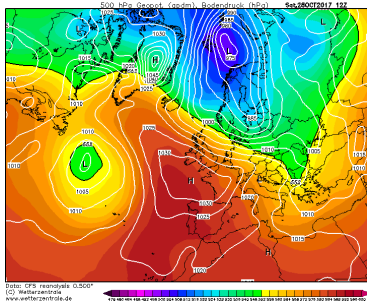
26



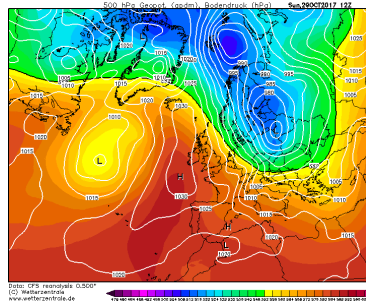
27



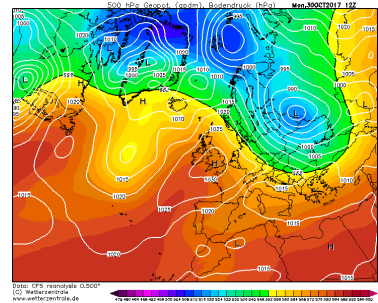
28



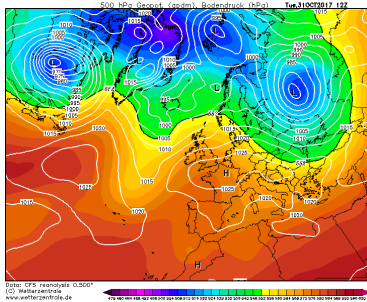
29



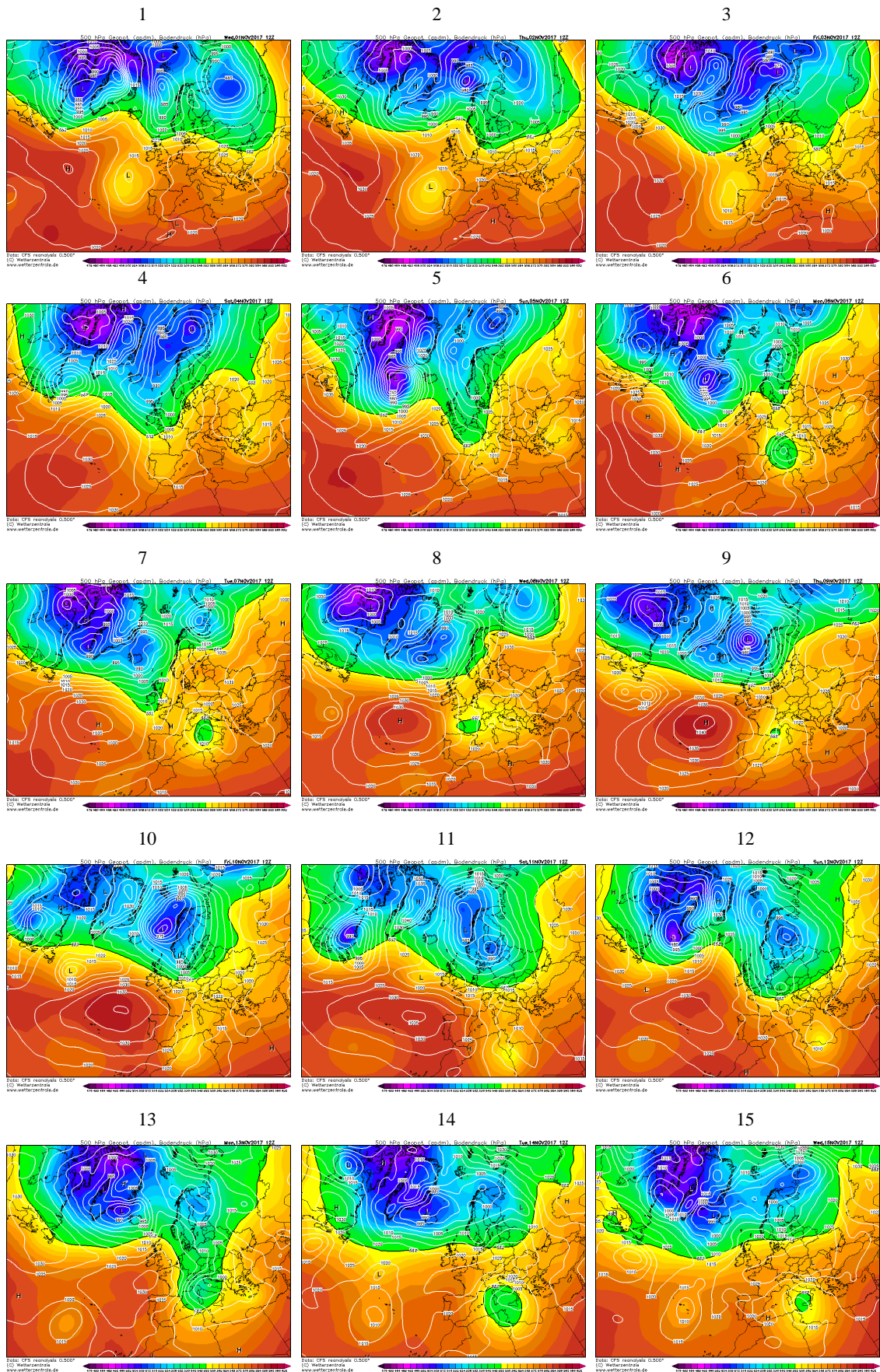
30



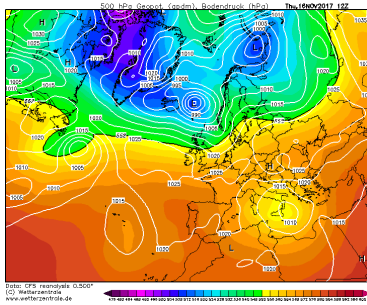
31



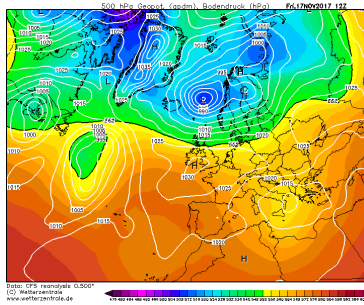
Noviembre



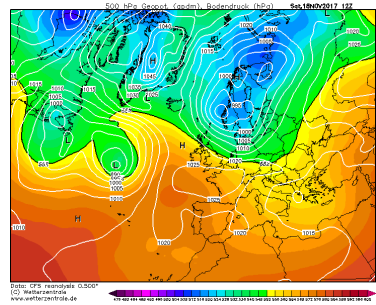
16



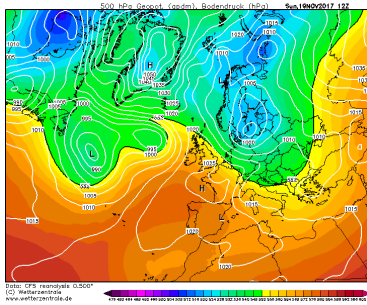
17



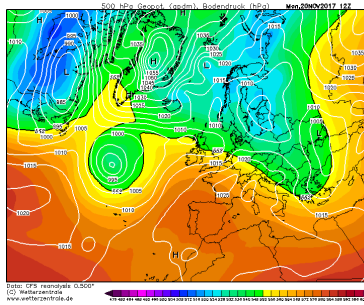
18



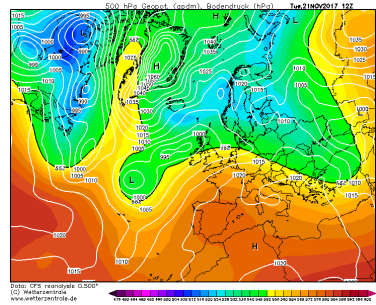
19



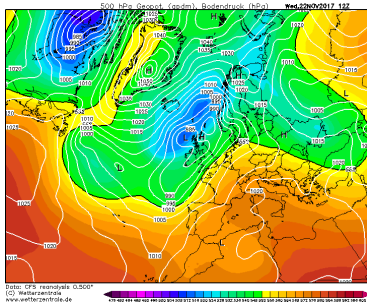
20



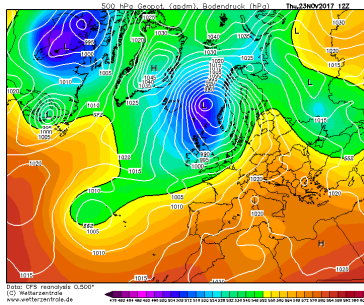
21



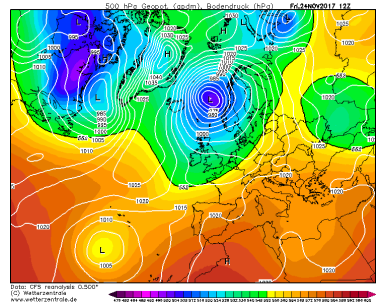
22



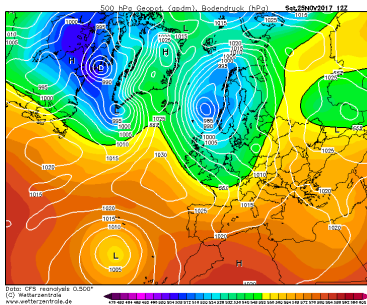
23



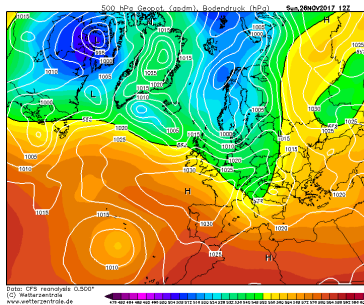
24



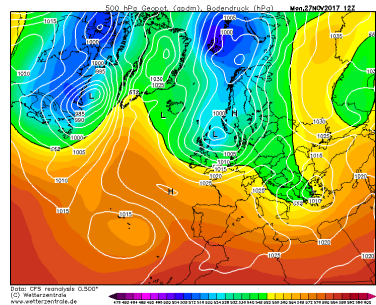
25



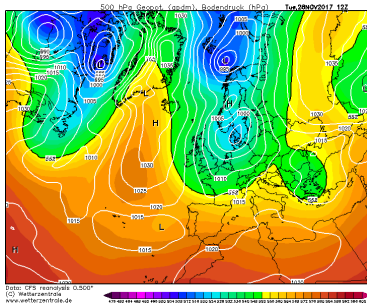
26



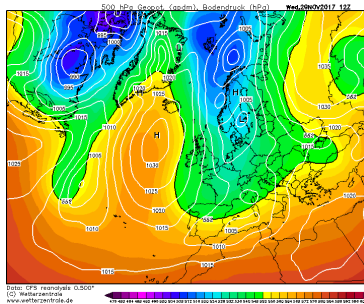
27



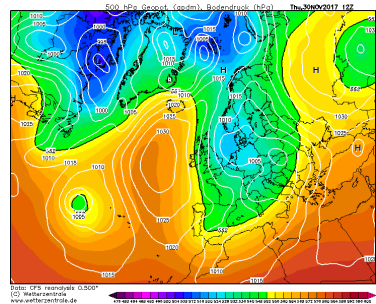
28



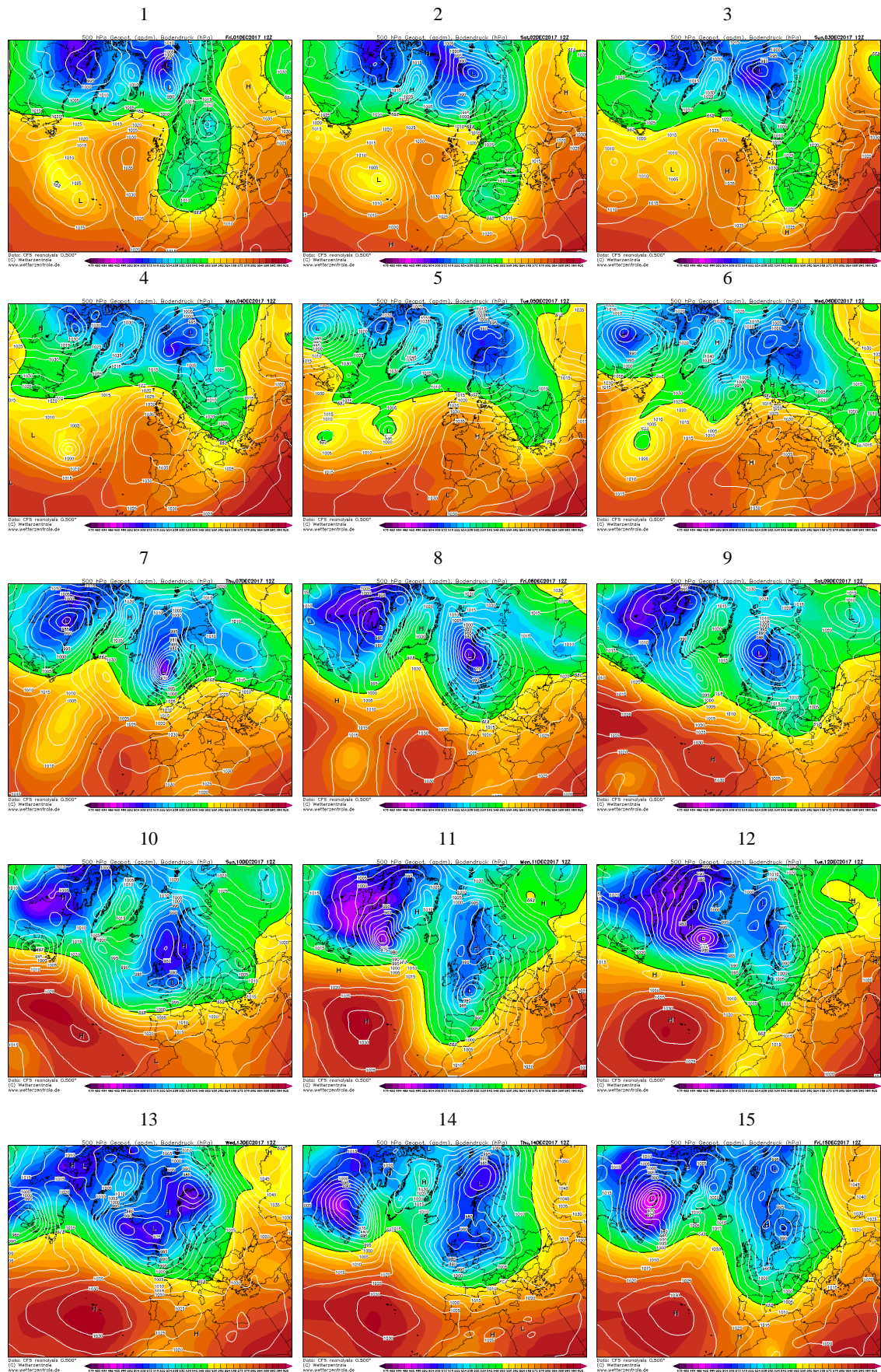
29



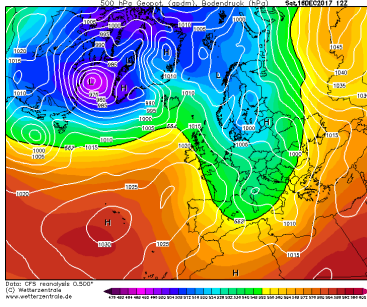
30



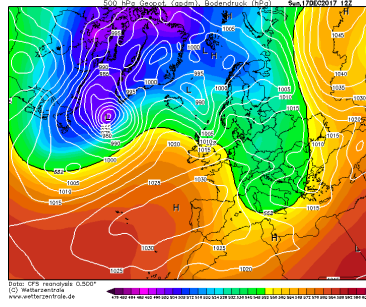
Diciembre



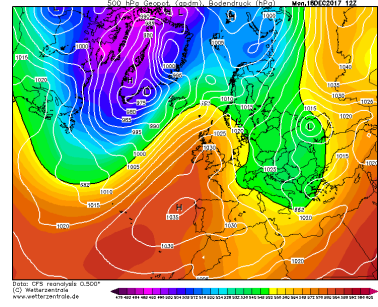
16



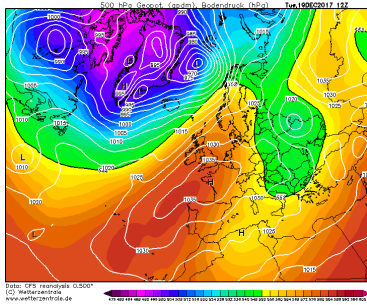
17



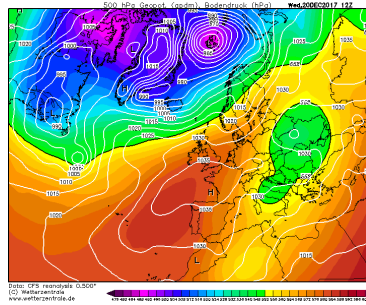
18



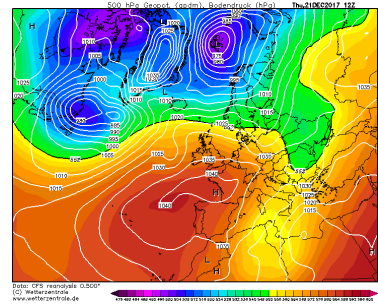
19



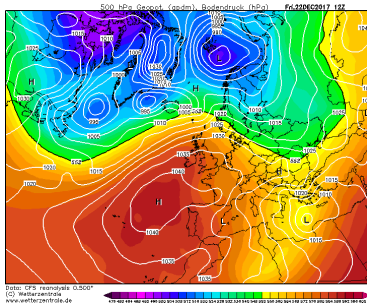
20



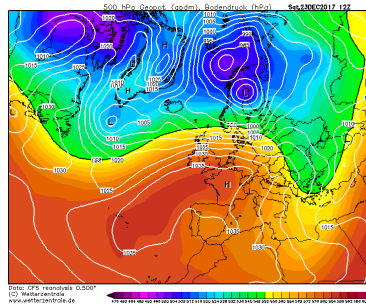
21



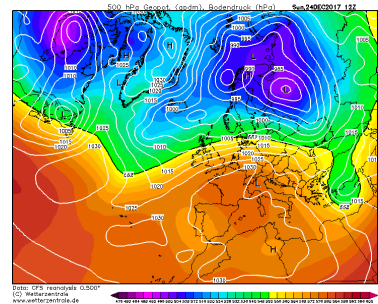
22



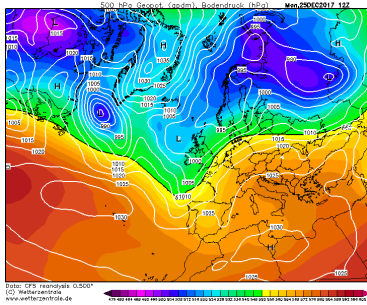
23



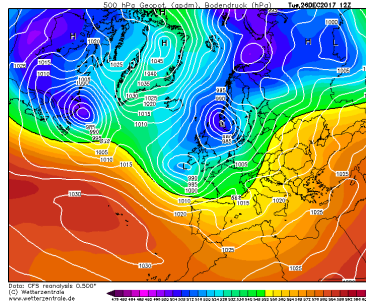
24



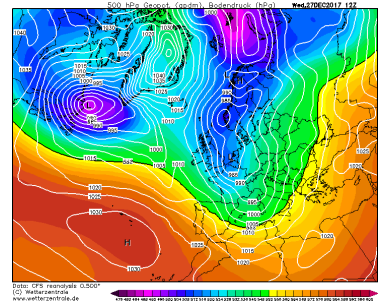
25



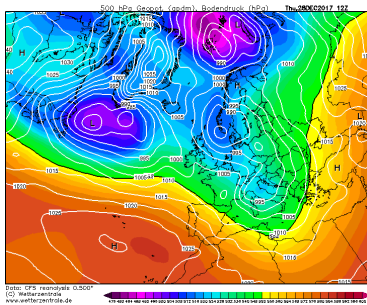
26



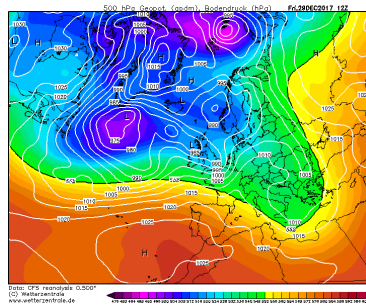
27



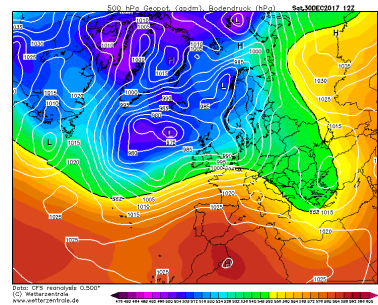
28

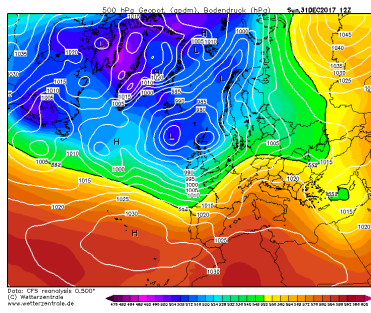


29



30





ANEXO II

Tablas con las situaciones sinópticas diarias identificadas correspondientes al año 2017.

Fecha	Situación meteorológica	Fecha	Situación meteorológica
01/01/17	Anticiclón	01/02/17	Advección del nordeste
02/01/17	Anticiclón	02/02/17	Advección del norte
03/01/17	Advección del nordeste	03/02/17	Advección del nordeste
04/01/17	Anticiclón	04/02/17	Advección del este
05/01/17	Advección del nordeste	05/02/17	Advección del noroeste
06/01/17	Anticiclón	06/02/17	Advección del nordeste
07/01/17	Anticiclón	07/02/17	Advección del noroeste
08/01/17	Anticiclón	08/02/17	Advección del noroeste
09/01/17	Anticiclón	09/02/17	Advección del nordeste
10/01/17	Advección del nordeste	10/02/17	Advección del noroeste
11/01/17	Advección del noroeste	11/02/17	Advección del oeste
12/01/17	Advección del noroeste	12/02/17	Advección del sur
13/01/17	Advección del noroeste	13/02/17	Advección del sur
14/01/17	Advección del noroeste	14/02/17	Pantano barométrico
15/01/17	Advección del nordeste	15/02/17	Pantano barométrico
16/01/17	Advección del nordeste	16/02/17	Pantano barométrico
18/01/17	Advección del nordeste	17/02/17	Anticiclón
19/01/17	Advección del este	18/02/17	Anticiclón
20/01/17	Advección del este	19/02/17	Anticiclón
21/01/17	Advección del este	20/02/17	Anticiclón
22/01/17	Advección del este	21/02/17	Anticiclón
23/01/17	Advección del nordeste	22/02/17	Baja térmica
24/01/17	Advección del nordeste	23/02/17	Advección del este
25/01/17	Advección del este	24/02/17	Advección del noroeste
26/01/17	Advección de norte	25/02/17	Advección del nordeste
27/01/17	Advección de norte	26/02/17	Anticiclón térmico
28/01/17	Baja	27/02/17	Advección del noroeste
29/01/17	Advección de sudoeste	28/02/17	Baja
30/01/17	Advección de sudoeste		
31/01/17	Anticiclón		

Fecha	Situación meteorológica
01/03/17	Advección del oeste
02/03/17	Advección del oeste
03/03/17	Advección del nordeste
04/03/17	Baja
05/03/17	Advección del noroeste
06/03/17	Advección del este
07/03/17	Advección del este
08/03/17	Anticiclón
09/03/17	Anticiclón
10/03/17	Anticiclón
11/03/17	Baja térmica
12/03/17	Baja térmica
13/03/17	Advección del noroeste
14/03/17	Advección del oeste
15/03/17	Advección del oeste
16/03/17	Anticiclón
17/03/17	Anticiclón
18/03/17	Anticiclón térmico
19/03/17	Baja
20/03/17	Advección del noroeste
21/03/17	Baja
22/03/17	Baja
23/03/17	Baja
24/03/17	Baja
25/03/17	Baja
26/03/17	Baja térmica
27/03/17	Anticiclón
28/03/17	Anticiclón
29/03/17	Anticiclón
30/03/17	Anticiclón
31/03/17	Anticiclón

Fecha	Situación meteorológica
01/04/17	Pantano barométrico
02/04/17	Baja
03/04/17	Anticiclón
04/04/17	Advección del sur
05/04/17	Baja térmica
06/04/17	Advección del suroeste
07/04/17	Baja térmica
08/04/17	Anticiclón
09/04/17	Anticiclón
10/04/17	Anticiclón
11/04/17	Anticiclón
12/04/17	Anticiclón
13/04/17	Anticiclón
14/04/17	Anticiclón
15/04/17	Anticiclón
16/04/17	Anticiclón
17/04/17	Anticiclón
18/04/17	Anticiclón
19/04/17	Advección del oeste
20/04/17	Advección del nordeste
21/04/17	Advección del oeste
22/04/17	Anticiclón
23/04/17	Anticiclón
24/04/17	Anticiclón
25/04/17	Pantano barométrico
26/04/17	Baja
27/04/17	Pantano barométrico
28/04/17	Baja
29/04/17	Advección del sur
30/04/17	Advección del noroeste

Fecha	Situación meteorológica
01/05/17	Baja
02/05/17	Anticiclón
03/05/17	Anticiclón
04/05/17	Anticiclón
05/05/17	Advección del noroeste
06/05/17	Advección del este
07/05/17	Anticiclón
08/05/17	Anticiclón
09/05/17	Anticiclón
10/05/17	Pantano barométrico
11/05/17	Advección del suroeste
12/05/17	Advección del suroeste
13/05/17	Anticiclón
14/05/17	Anticiclón
15/05/17	Anticiclón
16/05/17	Anticiclón
17/05/17	Anticiclón
18/05/17	Baja térmica
19/05/17	Baja
20/05/17	Anticiclón
21/05/17	Anticiclón
22/05/17	Baja térmica
23/05/17	Anticiclón
24/05/17	Anticiclón
25/05/17	Anticiclón
26/05/17	Anticiclón
27/05/17	Baja térmica
28/05/17	Advección del norte
29/05/17	Baja
30/05/17	Baja térmica
31/05/17	Advección del este

Fecha	Situación meteorológica
01/06/17	Pantano barométrico
02/06/17	Baja térmica
03/06/17	Baja
04/06/17	Baja
05/06/17	Advección del noroeste
06/06/17	Advección del noroeste
07/06/17	Anticiclón
08/06/17	Anticiclón
09/06/17	Anticiclón
10/06/17	Anticiclón
11/06/17	Anticiclón
12/06/17	Anticiclón
13/06/17	Pantano barométrico
14/06/17	Pantano barométrico
15/06/17	Pantano barométrico
16/06/17	Advección del suroeste
17/06/17	Anticiclón
18/06/17	Anticiclón
19/06/17	Anticiclón
20/06/17	Pantano barométrico
21/06/17	Pantano barométrico
22/06/17	Pantano barométrico
23/06/17	Anticiclón
24/06/17	Anticiclón
25/06/17	Pantano barométrico
26/06/17	Advección del noroeste
27/06/17	Advección del noroeste
28/06/17	Advección del noroeste
29/06/17	Advección del noroeste
30/06/17	Advección del noroeste

Fecha	Situación meteorológica
01/07/17	Advección del noroeste
02/07/17	Advección del oeste
03/07/17	Anticiclón
04/07/17	Anticiclón
05/07/17	Anticiclón
06/07/17	Pantano barométrico
07/07/17	Pantano barométrico
08/07/17	Baja
09/07/17	Anticiclón
10/07/17	Anticiclón
11/07/17	Anticiclón
12/07/17	Advección del noroeste
13/07/17	Advección del nordeste
14/07/17	Anticiclón
15/07/17	Advección del nordeste
16/07/17	Anticiclón
17/07/17	Baja
18/07/17	Advección del norte
19/07/17	Advección del sur
20/07/17	Pantano barométrico
21/07/17	Pantano barométrico
22/07/17	Baja
23/07/17	Baja
24/07/17	Advección del norte
25/07/17	Advección del norte
26/07/17	Advección del oeste
27/07/17	Advección del oeste
28/07/17	Pantano barométrico
29/07/17	Anticiclón
30/07/17	Pantano barométrico
31/07/17	Baja

Fecha	Situación meteorológica
01/08/17	Advección del noreste
02/08/17	Baja
03/08/17	Baja
04/08/17	Advección del noroeste
05/08/17	Advección del noreste
06/08/17	Advección del suroeste
07/08/17	Anticiclón
08/08/17	Advección del noroeste
09/08/17	Advección del noroeste
10/08/17	Advección del noroeste
11/08/17	Baja
12/08/17	Pantano barométrico
13/08/17	Pantano barométrico
14/08/17	Pantano barométrico
15/08/17	Advección del oeste
16/08/17	Anticiclón
17/08/17	Pantano barométrico
18/08/17	Pantano barométrico
19/08/17	Pantano barométrico
20/08/17	Baja
21/08/17	Baja
22/08/17	Anticiclón
23/08/17	Anticiclón
24/08/17	Anticiclón
25/08/17	Anticiclón
26/08/17	Anticiclón
27/08/17	Anticiclón
28/08/17	Anticiclón
29/08/17	Anticiclón
30/08/17	Anticiclón
31/08/17	Anticiclón

Fecha	Situación meteorológica
01/09/17	Baja
02/09/17	Baja
03/09/17	Anticiclón
04/09/17	Pantano barométrico
05/09/17	Anticiclón
06/09/17	Anticiclón
07/09/17	Anticiclón
08/09/17	Pantano barométrico
09/09/17	Anticiclón
10/09/17	Baja
11/09/17	Advección del noroeste
12/09/17	Advección del noroeste
13/09/17	Anticiclón
14/09/17	Advección del noroeste
15/09/17	Baja
16/09/17	Advección del noroeste
17/09/17	Advección del noroeste
18/09/17	Baja
19/09/17	Anticiclón
20/09/17	Anticiclón
21/09/17	Anticiclón
22/09/17	Advección del suroeste
23/09/17	Pantano barométrico
24/09/17	Advección del noroeste
25/09/17	Advección del noroeste
26/09/17	Baja
27/09/17	Anticiclón
28/09/17	Anticiclón
29/09/17	Anticiclón
30/09/17	Anticiclón

Fecha	Situación meteorológica
01/10/17	Baja
02/10/17	Anticiclón
03/10/17	Baja térmica
04/10/17	Anticiclón térmico
05/10/17	Anticiclón
06/10/17	Baja
07/10/17	Anticiclón térmico
08/10/17	Anticiclón térmico
09/10/17	Anticiclón
10/10/17	Anticiclón
11/10/17	Anticiclón
12/10/17	Anticiclón
13/10/17	Anticiclón
14/10/17	Anticiclón
15/10/17	Anticiclón
16/10/17	Pantano barométrico
17/10/17	Pantano barométrico
18/10/17	Advección del suroeste
19/10/17	Advección del suroeste
20/10/17	Advección del suroeste
21/10/17	Advección del este
22/10/17	Advección del este
23/10/17	Anticiclón
24/10/17	Anticiclón
25/10/17	Anticiclón
26/10/17	Anticiclón
27/10/17	Anticiclón
28/10/17	Anticiclón térmico
29/10/17	Anticiclón
30/10/17	Anticiclón térmico
31/10/17	Anticiclón

Fecha	Situación meteorológica
01/11/17	Baja
02/11/17	Baja
03/11/17	Anticiclón
04/11/17	Pantano barométrico
05/11/17	Anticiclón
06/11/17	Anticiclón
07/11/17	Anticiclón
08/11/17	Pantano barométrico
09/11/17	Anticiclón
10/11/17	Baja
11/11/17	Advección del noroeste
12/11/17	Advección del noroeste
13/11/17	Anticiclón
14/11/17	Advección del noroeste
15/11/17	Baja
16/11/17	Advección del noroeste
17/11/17	Anticiclón
18/11/17	Anticiclón
19/11/17	Anticiclón
20/11/17	Pantano barométrico
21/11/17	Anticiclón
22/11/17	Advección del suroeste
23/11/17	Advección del suroeste
24/11/17	Advección del suroeste
25/11/17	Advección del noroeste
26/11/17	Baja
27/11/17	Anticiclón
28/11/17	Anticiclón
29/11/17	Anticiclón
30/11/17	Anticiclón

Fecha	Situación meteorológica
01/12/17	Advección del noroeste
02/12/17	Baja
03/12/17	Baja
04/12/17	Anticiclón
05/12/17	Anticiclón
06/12/17	Anticiclón
07/12/17	Anticiclón
08/12/17	Advección del noroeste
09/12/17	Advección del noroeste
10/12/17	Advección del oeste
11/12/17	Advección del oeste
12/12/17	Advección del noroeste
13/12/17	Anticiclón
14/12/17	Advección del noroeste
15/12/17	Advección del noroeste
16/12/17	Advección del norte
17/12/17	Anticiclón
18/12/17	Anticiclón
19/12/17	Advección del noreste
20/12/17	Anticiclón
21/12/17	Anticiclón
22/12/17	Anticiclón
23/12/17	Anticiclón
24/12/17	Anticiclón
25/12/17	Anticiclón
26/12/17	Advección del oeste
27/12/17	Advección del oeste
28/12/17	Baja
29/12/17	Advección del oeste
30/12/17	Advección del suroeste
31/12/17	Advección del suroeste